

Р9-2012-108

ИТОГИ 44-ГО И 45-ГО СЕАНСОВ НУКЛОТРОНА

Аверичев А. С., Агапов Н. Н., Алфеев А. В., Андреев В. А., Базанов А. М., Балдин А. А., Батин В. И., Блинов Н. А., Бровко О. И., Бутенко А. В., Василишин Б. В., Вишневский А. В., Волков В. И., Галимов А. Р., Говоров А. И., Горбачев Е. В., Елисеев А. В., Иванов Е. В., Исадов В. А., Карпинский В. Н., Кириченко А. Е., Кобец А. Г., Коваленко А. Д., Козлов О. С., Кудашкин А. В., Кудашкин И. В., Куликов И. И., Кунченко О. А., Лебедев Н. И., Левтеров К. А., Мешков И. Н., Михайлов В. А., Мончинский В. А., Нестеров А. В., Никитаев П. И., Осипенков А. Л., Пиляр Н. В., Рамздорф А. Ю., Романов С. В., Рукояткин П. А., Рукояткина Т. В., Сальников В. В., Семин Н. В., Слепнев В. М., Слепнев И. В., Сидорин А. О., Смирнов А. В., Трубников Г. В., Тузиков А. В., Филиппов А. В., Филиппов Н. А., Ходжибагиян Г. Г., Швидкий Д. С., Шурхно Н. А.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Штассен Р.

Исследовательский центр, Юлих, Германия

Бонев И., Гешков И., Тонев Д., Цаков И.

Институт ядерных исследований и ядерной энергетики БАН, София, Болгария

Минчев М.

Софийский университет им. Св. Климента Охридского, София, Болгария

Ондршиш Л., Крушински Д.

Институт проблем измерений САН, Братислава, Словакия

Хидбавны П.

«Вакуум-Прага», Прага, Чехия

Герек И., Юрнечка А.

Электротехнический исследовательский и проектный институт (EVPU a.s.), Нова Дубница, Словакия

Аверичев А. С. и др.

P9-2012-108

Итоги 44-го и 45-го сеансов нуклотрона

Полная продолжительность 44-го (ноябрь – декабрь 2011 г.) и 45-го (февраль – март 2012 г.) сеансов составила примерно 2150 ч, из которых примерно 900 ч пучок был использован для проведения исследований в рамках выполнения программы физических исследований и программы развития ускорителя. Из наиболее заметных достижений по развитию комплекса в 44-м сеансе можно отметить ускорение пучка дейтронов до рекордной энергии 4 ГэВ/нуклон и реализацию при этой энергии медленного вывода. В ходе 45-го сеанса работы нуклотрона полностью выполнена намеченная на сеанс программа физических исследований, включавшая в себя эксперименты на пучках дейтронов (выведенных и на внутренней мишени) с энергией до 4 ГэВ/нуклон. В ходе сеанса реализовано ускорение и вывод пучка дейтронов при энергии 4,5 ГэВ/нуклон.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2012

Averichev A. S. et al.

P9-2012-108

Results of the 44th and 45th Nuclotron Runs

Total duration of the 44th (November – December 2011) and 45th (February – March 2012) runs was about 2150 h. During about 900 h the beam was used for experiments in the framework of current program of physical investigations and for the machine development. Among more important achievements during the 44th run one can mention the deuteron beam acceleration up to a record energy of 4 GeV/u and realization of the beam slow extraction at this energy. During the 45th run the scheduled program of physical investigations including experiments with the deuteron beam (extracted and at the internal target) of energy up to 4 GeV/u was fully implemented. During the run the beam acceleration and slow extraction at 4.5 GeV/u were realized.

The investigation has been performed at the Veksler and Balдин Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Активно продолжающееся развитие ускорительного комплекса ЛФВЭ направлено на решение двух взаимосвязанных задач. В первую очередь это освоение нового оборудования, установленного в ходе модернизации комплекса, завершение модернизации ряда систем ускорителя с целью поэтапного улучшения параметров ускоренных пучков для проведения физических исследований. С точки зрения параметров пучков, предоставляемых для экспериментов, эти работы ориентированы на:

- поэтапное увеличение энергии, вплоть до максимальной проектной;
- повышение интенсивности за счет снижения потерь при захвате и ускорении;
- повышение стабильности и надежности работы ускорительного комплекса;
- обеспечение требуемого качества медленного вывода пучка.

Кроме того, для расширения спектра ускоряемых частиц проводятся работы по развитию источников ионов и модернизации инжекционного комплекса нуклотрона.

Не менее важным является развитие ускорителя, ориентированное на тестирование элементов коллайдера NICA и освоение современных ускорительных технологий. Это обусловлено тем, что нуклотрон, имеющий ту же магнитную жесткость, что и коллайдер NICA, и магнитную систему, основанную на магнитах того же типа, является наиболее подходящей базовой установкой для экспериментального тестирования режимов работы коллайдера и проведения НИОКР по целому ряду его систем. В рамках этих работ решаются следующие основные задачи:

- освоение методик настройки и прецизионного измерения параметров ускорителя;
- испытание и исследования устройств диагностики параметров ионного пучка;
- исследование работы магнитно-криостатной системы в режиме с длительными (несколько тысяч секунд) «столами» магнитного поля;
- исследование механизмов потерь частиц при длительной циркуляции;
- исследование различных методов стохастического охлаждения.

Решение этих задач требует:

- доработки цифровой помехозащищенной системы измерения положения замкнутой орбиты в любой заданной точке цикла магнитного поля;
- развития системы коррекции для оптимизации положения орбиты как в процессе ускорения, так и на «столе» поля;
- расширения функциональных возможностей цифрового задающего генератора ускоряющей ВЧ-системы, необходимого для измерения таких параметров ускорителя, как дисперсионная функция и критическая энергия;
- развития циклозадающей аппаратуры и системы питания структурных магнитов, необходимого как для реализации режима «длинных» столов, так и для гибкой настройки рабочей точки;
- создания диагностической аппаратуры и отработки методик измерения временных характеристик ступок ускоряемых частиц и прецизионного измерения частот бетатронных колебаний в течение всего цикла ускорения;
- создания комплекса аппаратуры для отработки различных методов стохастического охлаждения.

Заметная часть этих задач решена в ходе 44-го и 45-го сеансов работы нуклотрона.

1. КРАТКИЙ ОБЗОР СЕАНСОВ

44-й сеанс был проведен в период с 8 ноября по 30 декабря 2011 г., его продолжительность составила 1351 ч. Из-за большого объема вновь установленного оборудования и проблем, возникающих при вводе его в эксплуатацию, количество технологических смен в 44-м сеансе оказалось больше запланированного. В самом начале сеанса возникла необходимость проведения ремонтных работ на одной из структурных линз ускорителя. Эта работа была выполнена без прекращения сеанса. Отопление одного полукольца нуклотрона до комнатной температуры, проведение ремонтных работ и охлаждение были выполнены менее чем за 12 суток. В течение этого времени «холодное» полукольцо использовалось в качестве нагрузки при отладке режима работы системы питания. В ходе сеанса ускорялись ионы углерода от лазерного источника и дейтроны от дуоплазмотрона.

45-й сеанс был проведен с 22 февраля по 26 марта 2012 г., его продолжительность составила 793 ч. 67 % времени сеанса составили эксперименты с пучком по программе физических исследований и по программе развития нуклотрона (рис. 1.1). В этом сеансе ускорялись только ионы дейтерия. Программа запланированных на сеанс физических исследований была полностью выполнена.

Программа сеансов сочетала в себе как продолжение традиционных для ЛФВЭ исследований, так и развитие работ, ориентированных на реализацию проекта NICA. Среди последних следует отметить:

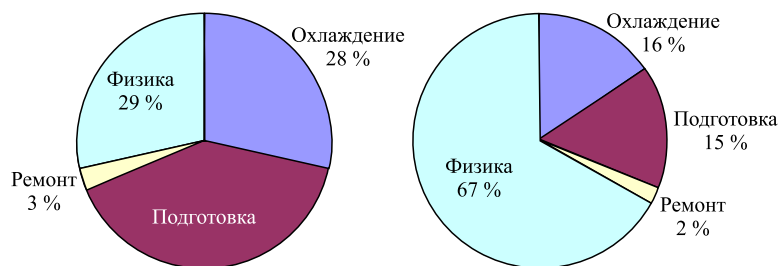


Рис. 1.1. Статистика распределения времени: слева — сеанс №44, справа — сеанс №45 [1]

— отладку режимов работы системы питания, циклозадающей и диагностической аппаратуры при длительностях «стола» магнитного поля до 1000 с, что является имитацией работы коллайдера;

— создание и тестирование комплекса аппаратуры канала стохастического охлаждения на нуклотроне;

— продолжение тестирования элементов детектора MPD;

— начало методических исследований по проекту VM@N.

Важность проекта VM@N (Baryonic Matter at Nuclotron), подготовленного совместно ЛФВЭ ОИЯИ и научным центром GSI (Дармштадт, Германия), заключается в том числе в том, что это будет первая по срокам реализации фаза широкомасштабной программы исследований плотной сильновзаимодействующей материи на пучках нуклотрона и коллайдере NICA в ОИЯИ и в рамках проекта FAIR (Дармштадт, Германия) на детекторе CBM (в создании которого ОИЯИ также принимает участие). Впервые развернутое обсуждение проекта на ПКК ОИЯИ прошло в июне 2011 г., и уже два сеанса нуклотрон работает на его реализацию. Местом размещения рабочей зоны данного экс-

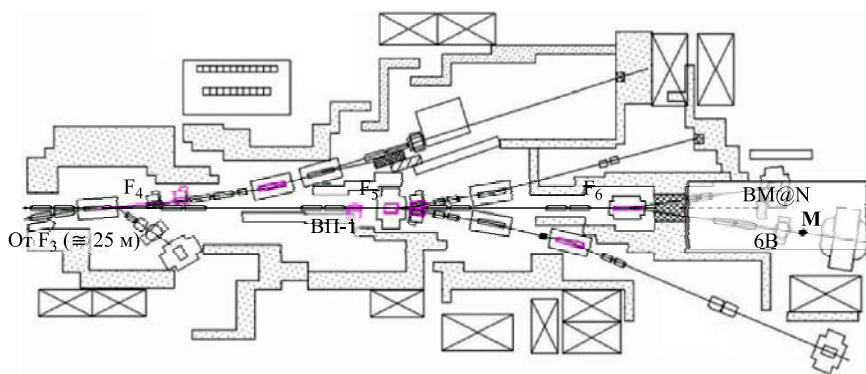


Рис. 1.2. Расположение экспериментальной зоны эксперимента VM@N в корпусе 205

перимента выбран канал 6В (рис. 1.2). Пробные проводки пучка в зону разрабатываемой установки VM@N осуществлялись в 44-м сеансе при ускорении и последующем медленном выводе ядер углерода при энергии 3,4 ГэВ/нуклон и дейтронов при энергии 4 ГэВ/нуклон в 45-м сеансе. Транспортировка выведенного пучка от конечной точки системы медленного вывода, фокуса F_3 , до места расположения мишени установки (М) осуществлялась на базе $\cong 110$ м магнитной оптикой каналов ВП-1 и 6В, включающей семь дублетов линз тика K200 и три поворотных магнита. Реализовывалась типичная оптическая схема, при которой между F_3 и фокусом у мишени эксперимента формируются три промежуточных фокуса — F_4 , F_5 и F_6 . На сформированных тестовых пучках проводилось опробование элементов DAQ эксперимента. В плане реализации в будущих экспозициях режимов при максимальных энергиях пучка (до 6 ГэВ/нуклон) и при больших длительностях вывода (до 10 с) планируется проведение определенной профилактики (модернизации) в части обеспечения необходимых условий эксплуатации ряда элементов каналов транспортировки.

В ходе смен по развитию нуклотрона продолжались работы по совершенствованию средств диагностики пучка, оптимизации и отработке новых режимов работы ускорителя. В том числе была продемонстрирована устойчивая циркуляция пучка с энергией до 3 ГэВ/нуклон при длительности «стола» поля до 1000 с. Осуществлялось поэтапное повышение энергии ускоренного пучка, и в ходе 45-го сеанса реализовано ускорение и вывод пучка дейтронов при энергии 4,5 ГэВ/нуклон.

2. ПОЭТАПНОЕ ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПУЧКА

После того как в ходе 42-го сеанса была продемонстрирована возможность стабильной и безопасной работы магнитной системы нуклотрона вплоть до поля дипольных магнитов, равного 2 Тл [2], одной из основных задач «ускорительных» смен является поэтапное повышение энергии пучка вплоть до максимальной проектной величины и реализация медленного вывода пучка во всем диапазоне энергий. Ранее рекордная энергия дейтронов около 3,8 ГэВ/нуклон была получена в течение одной смены в 39-м сеансе [3], при этом вывод пучка не производился.

На начальной стадии 44-го сеанса пучок ядер углерода был ускорен до 3,42 ГэВ/нуклон, выведен и использован для физических экспериментов.

18 декабря было обеспечено ускорение пучка дейтронов с интенсивностью примерно $2 \cdot 10^{10}$ до энергии 4 ГэВ/нуклон и настроен медленный вывод с высокой эффективностью. Однако после примерно одной смены работы в таком режиме по программе эксперимента «Энергия + трансмутация» интенсивность ускоренного пучка уменьшилась примерно на два порядка. В даль-

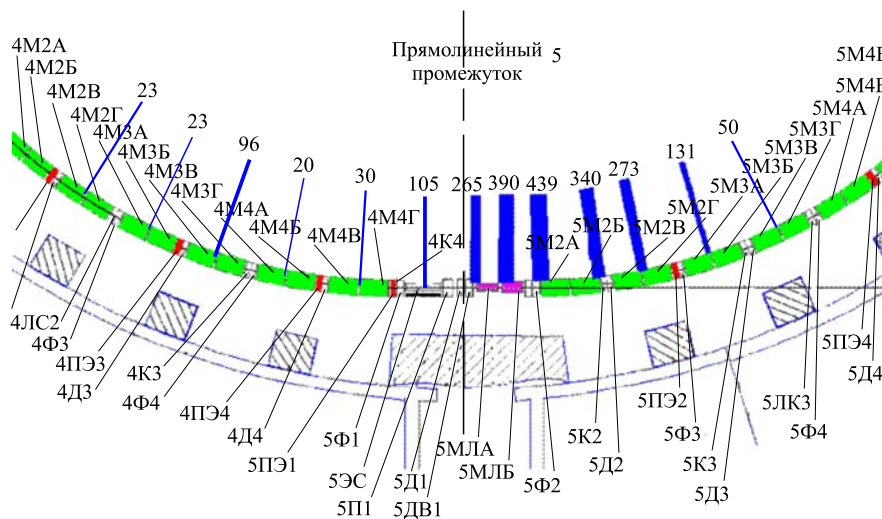


Рис. 2.1. Результаты измерения нейтронного фона в тоннеле нуклотрона в районе элементов системы медленного вывода. 44-й сеанс

нейшем восстановить исходный режим работы так и не удалось, и завершающую часть сеанса ускоритель отработал при меньших энергиях и интенсивности на уровне нескольких единиц — 10^9 . Анализ причин возникновения этой ситуации осложнился тем, что 18 декабря произошла длительная просадка напряжения сети, что привело к аварийному отключению ряда систем ускорителя. Однако по характеру искажения равновесной орбиты и по распределению потерь по периметру нуклотрона (рис. 2.1) был сделан вывод о том, что, наиболее вероятно, причина снижения интенсивности связана с нарушением штатной работы одного из устройств системы медленного вывода, включающей в себя электростатический септум и два магнита Ламбертсона.

При подготовке к 45-му сеансу был вскрыт криостат и проведен визуальный контроль элементов медленного вывода — механических повреждений обнаружено не было. Кроме механических повреждений, еще одной причиной снижения интенсивности мог быть короткозамкнутый сверхпроводящий виток, установленный во втором магните Ламбертсона для компенсации рассеянных полей в камере циркулирующего пучка. Этот виток необходим при работе ускорителя на максимальных полях. Рассеянные поля начинают проявляться с поля дипольных магнитов примерно 1,5 Тл, и при поле 2 Тл без компенсации по расчетам рассеянное поле на оси циркулирующего пучка составляет примерно 250 Гс, а вблизи ножа магнита — свыше 1,5 кГс. При возникновении в короткозамкнутом витке «замороженного» тока создаваемое им поле при инжекции может приводить к искажению орбиты в вертикальной

плоскости и, соответственно, снижению интенсивности захваченного пучка. Для проверки такой возможности и в качестве меры по борьбе с таким эффектом на короткозамкнутый виток была установлена спираль для нагрева, позволяющая переводить виток в нормальнопроводящее состояние без отопления соседних элементов магнитной системы.

В ходе 45-го сеанса эффект снижения интенсивности при длительной работе с полем 1,5 Тл повторился. После кратковременного перевода короткозамкнутого витка в нормальнопроводящее состояние интенсивность была восстановлена на прежнем уровне. Проведено несколько тестовых экспериментов, однозначно показавших, что причиной падения интенсивности является именно «замороженный» ток короткозамкнутого витка. Для выяснения причины возникновения этого тока к 46-му сеансу на виток будет установлен датчик тока. Использование процедуры нагрева короткозамкнутого витка позволило успешно выполнить программу экспериментов при энергии 4 ГэВ/нуклон. В завершающих сменах 45-го сеанса был проведен тестовый эксперимент, в ходе которого пучок дейтронов ускорен до энергии 4,5 ГэВ/нуклон (поле дипольных магнитов примерно 1,8 Тл) и продемонстрирована возможность медленного вывода при этой энергии.

Следует отметить, что повышение энергии выведенного пучка не является самоцелью. Кроме задач перспективных, ориентированных на создание комплекса NICA, увеличение энергии пучка имеет, например, огромное значение для исследований, проводимых в рамках программы «Энергия + трансмутация».

3. РАЗВИТИЕ ОСНОВНОЙ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ

Одной из основных «ускорительных» задач 44-го и 45-го сеансов являлась оптимизация режимов работы новой системы электропитания и защиты элементов магнитной структуры нуклотрона. В настоящее время вся цепь дипольных магнитов и квадрупольных линз, включенных последовательно, питается общим основным источником, который был введен в опытную эксплуатацию и оптимизирован для работы вплоть до максимального тока 6 кА и темпом роста поля до 1 Тл/с в ходе 42-го сеанса [2]. Положение рабочей точки ускорителя настраивается с помощью дополнительного источника меньшей мощности, уменьшающего ток, протекающий в цепи последовательно соединенных фокусирующих и дефокусирующих линз (источник токоотбора) [4]. Этот источник в макетном варианте был испытан в ходе 43-го сеанса, а к началу 44-го сеанса подготовлен его полнофункциональный прототип.

Источник токоотбора построен следующим образом (рис. 3.1). Основной силовой частью является управляемый мостовой 6-фазный тиристорный выпрямитель ТВ (реализуемый на базе доработанного источника 37ТВ), запитанный от согласующего анодного трансформатора ТА и управляющийся

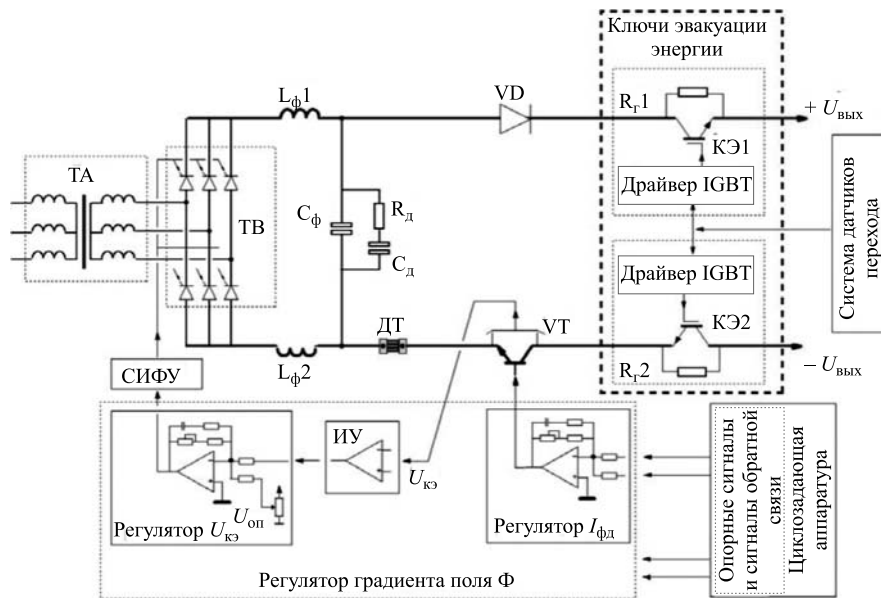


Рис. 3.1. Структурная схема источника токоотбора

системой импульсно-фазового управления (СИФУ). Силовой фильтр $L_{\phi 1,2}$, C_{ϕ} , $C_{д}$, $R_{д}$ сглаживает пульсации несущей частоты преобразования 300 Гц. Силовой транзисторный модуль VT обеспечивает требуемое качество поддержания выходного тока во всем динамическом диапазоне. Диод VD предотвращает протекание тока в обратном направлении. Электронные ключи КЭ1, 2 системы эвакуации энергии, представляющие собой мощные интеллектуальные IGBT-транзисторы, включаются (а вернее отключаются) и вводят при этом в цепь резисторы гашения поля $R_{r1, 2}$ по команде от системы детектирования срыва сверхпроводимости синхронно с ключами КТ1–6. Сигнал тока с датчика тока ДТ используется в системе внутренних защит источника (на схеме не показаны).

Алгоритм работы источника построен на активном формировании требуемого тока отбора модулем VT, работающем в линейном режиме. Стабилизация напряжения коллектор–эмиттер $U_{кэ}$ транзисторного модуля VT осуществляется за счет управления ТВ. Уровень напряжения $U_{кэ}$ (задается $U_{оп}$) определяется из условий минимальной рассеиваемой мощности при достаточных запасах для обеспечения работы во всем динамическом диапазоне. Входные сигналы и сигналы обратной связи формируются циклозадающей аппаратурой.

Перед 44-м сеансом макет источника токоотбора был испытан на эквивалентной нагрузке, однако в ходе настройки источника в начале сеанса вы-



Рис. 3.2. Источник 37ТВ с пассивным фильтром. 44-й сеанс

яснилось, что при работе с реальной нагрузкой силовой транзисторный блок не обеспечивает требуемые технические параметры. Во время отепления полукольца нуклотрона был собран и испытан с использованием охлажденной части кольца в качестве нагрузки пассивный фильтр на основе батареи конденсаторов (рис. 3.2). Это обеспечило устойчивую эксплуатацию магнитной системы в ходе сеанса, однако возможности по управлению источником токоотбора были существенно ограничены.

В промежутке между сеансами транзисторный силовой блок регулятора источника токоотбора 37ТВ был доработан и в ходе 45-го сеанса введен в работу. В результате была обеспечена требуемая стабильность положения рабочей точки в процессе ускорения, оптимизирована совместная работа основного источника и источника токоотбора до уровня поля примерно 1,8 Тл и производной поля до 8 кГс/с. Отклонение значения отношения градиента линз к полю диполь-

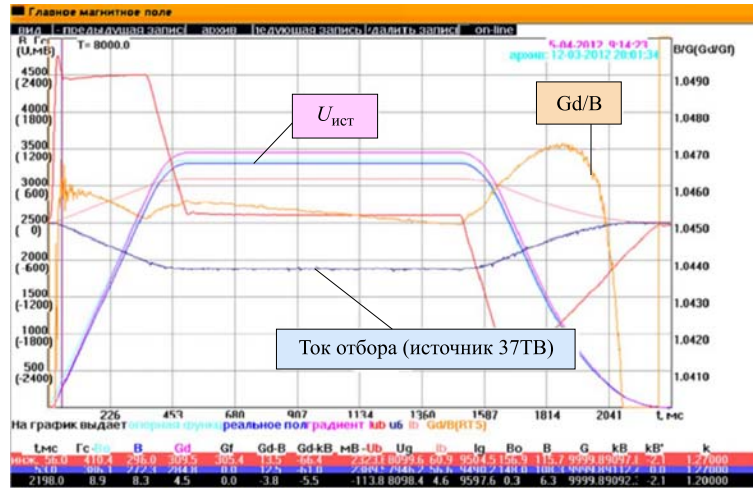


Рис. 3.3. Диаграмма цикла магнитного поля при темпе роста 8 кГс/с. Вертикальная линия соответствует полю инжекции. 45-й сеанс

ных магнитов от заданного в течение цикла не превышало 0,1 % (рис. 3.3), однако вблизи поля инжекции в ряде режимов наблюдался повышенный уровень пульсаций. В основном из-за недостатка времени в ходе 45-го сеанса не удалось обеспечить высокую степень стабилизации тока основного источника на «столе» медленного вывода, что приводило к пульсации во времени тока выведенного пучка.

Работа источников была оптимизирована и при токе отбора, соответствующем проектному положению рабочей точки нуклотрона. Были определены требуемые параметры источника токоотбора при работе в проектной рабочей точке в полном динамическом диапазоне, вплоть до максимального поля.

4. ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ

В режимах работы с большим темпом роста поля, требующих работы двух ускоряющих станций, в ходе предыдущих сеансов наблюдались заметные потери частиц в процессе ускорения. При подготовке к 44-му сеансу была проведена проверка и юстировка симметрии фазовых соотношений между одноименными элементами усилительных трактов и устройств систем автоподстройки частоты (АПЧ) обеих ускорительных станций. В результате обеспечена суммарная величина расхождения (обусловленная отличием работы активных устройств ускоряющих станций) не более чем $\pm 10^\circ$. Были изготовлены и введены в опытную эксплуатацию: специальный фазовый детектор для контроля динамики изменения остаточного разбаланса фаз в процессе ускорения; аппаратура отдельной программной коррекции тока подмагничивания резонаторов на обеих ускоряющих станциях, позволяющая компенсировать запаздывание тока подмагничивания (из-за большой индуктивности резонаторов на начальном этапе ускорения) опережающим воздействием, а также корректировать медленные фазовые сдвиги в процессе ускорения; дополнительные усилители подмагничивания резонаторов с увеличенным внутренним сопротивлением для повышения быстродействия системы АПЧ в начале цикла ускорения. В рабочий цикл ускоряющих станций добавлена операция устранения остаточной намагниченности феррита резонаторов путем подачи на них до начала ускорения высокочастотной мощности, обеспечивающая большую точность настройки на начальной частоте и тем самым позволяющая уменьшить напряженность режимов выходных усилителей при получении максимальной амплитуды. Попутно, при решении этой задачи, были модернизированы устройства синхронизации ускоряющей системы.

Эти меры в совокупности с оптимизацией режимов работы цифрового задающего генератора позволили в ходе 44-го и 45-го сеансов свести потери частиц в процессе ускорения до уровня, не превышающего нескольких процентов.

Минимизация потерь частиц в процессе захвата и на начальной стадии ускорения требует:

- оптимизации параметров пучка при инжекции;
- коррекции орбиты пучка, включающей в себя минимизацию отклонения орбиты от оптической оси ускорителя и организацию оптимального бампа орбиты в районе медленного вывода;
- поддержания оптимальной геометрии орбиты в течение цикла ускорения;
- реализации адиабатического захвата в процесс ускорения.

В ходе 44-го и 45-го сеансов проводились работы по оптимизации параметров пучка при инжекции и токов корректирующих магнитов. Процедура включает в себя следующие стадии.

Первоначально, по показаниям профилометров, расположенных в канале транспортировки на выходе ЛУ-20, формируется опорная траектория инжекции, обеспечивающая прохождение пучка через первый пикап-электрод в кольце с близким к нулю отклонением от оси.

Затем последовательно с помощью корректирующих магнитов пучок проводится первый оборот с близкими к нулю отклонениями в местах расположения остальных пикап-электродов. Траектория замыкается за счет проводки пучка после первого оборота через первый пикап-электрод с теми же координатами, что и при инжекции. Путем измерения положения орбиты циркулирующего пучка решается задача согласования инжектируемого пучка по углам.

В ходе 45-го сеанса эта процедура в полном объеме была реализована для двух рабочих точек нуклотрона: с частотами бетатронных колебаний $Q \approx 7,2$ (рабочая точка, используемая в большинстве предыдущих сеансов) (рис. 4.1)

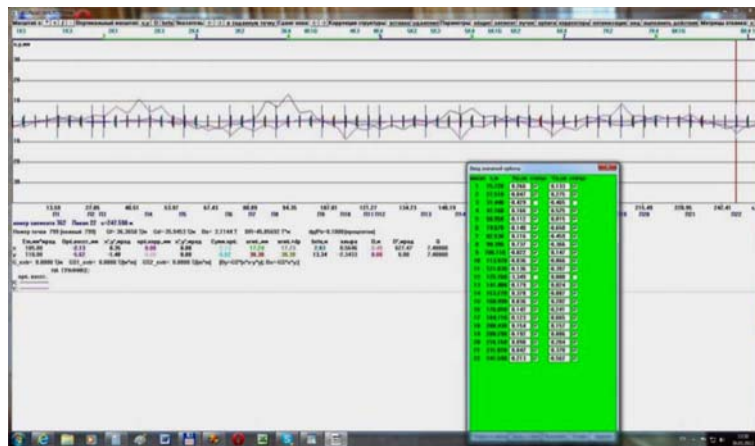


Рис. 4.1. Геометрия скорректированной орбиты в рабочей точке $Q \approx 7,2$. 45-й сеанс

и в проектной рабочей точке, соответствующей частотам $Q \approx 6,8$. При этом удалось свести максимальное отклонение орбиты от оптической оси до 18 мм от максимума до максимума.

В завершающих ускорительных сменах 45-го сеанса были проведены работы по реализации бампа орбиты в районе медленного вывода, необходимого для обхода электростатического септума, осуществляемого с помощью 4 ближайших дипольных магнитов (рис. 4.2). Амплитуда бампа последовательно увеличивалась, при этом контролировался уровень потерь частиц при



Рис. 4.2. Геометрия скорректированной орбиты с бампом в районе медленного вывода в проектной рабочей точке $Q \approx 6,8$. 45-й сеанс

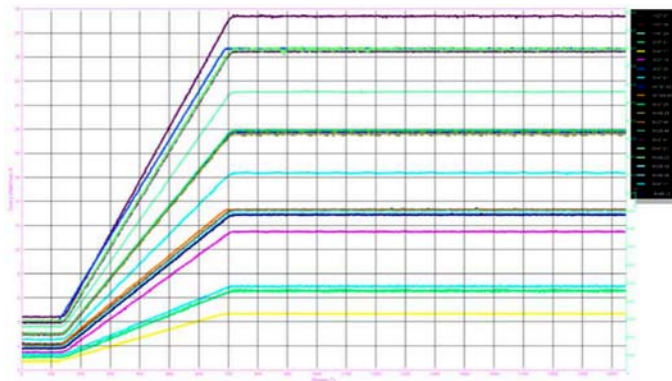


Рис. 4.3. Зависимость тока корректирующих магнитов от времени в течение цикла магнитного поля. 45-й сеанс

захвате. Детальная оптимизация амплитуды бампа не была завершена, однако было показано, что потери при захвате могут быть уменьшены как минимум на 20 %.

В ходе 45-го сеанса был протестирован режим работы корректирующих магнитов в цикле, синхронно с основным магнитным полем. Токи во всех корректорах соответствовали оптимальным на поле инжекции и изменялись линейно с ростом основного магнитного поля ($I = I_{\text{инж}}/B_{\text{инж}} \times B$, см. рис. 4.3). При работе с пучком в таком режиме на начальном участке ускорения происходило резкое снижение интенсивности, которое приводило к полной гибели пучка за первые 300–400 мс.

Наиболее вероятная причина этого явления — влияние остаточных полей на геометрию орбиты при инжекции, которое с ростом поля нивелируется. Величина остаточных полей оценивалась путем измерений поля в измерительном магните датчиком Холла, проведенных в начале 45-го сеанса. Измерения проводились при питании магнитной системы от источников постоянного тока при настроенной циркуляции пучка. Ток питания дипольных магнитов составлял 82,3 А, что соответствовало полю измерительного магнита 294,5 Гс, измеренному внутри магнита на расстоянии 8 см от его фланца. В отсутствие тока питания магнитное поле в той же точке составляло примерно 1,37 Гс.

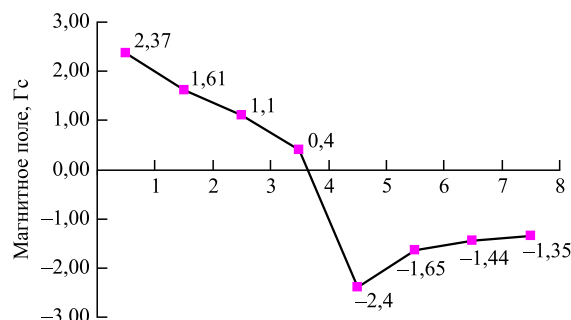


Рис. 4.4. Зависимость величины остаточного магнитного поля от расстояния до фланца (в см) в дипольном магните В0. 45-й сеанс

Распределение остаточного поля вдоль оси измерительного магнита в отсутствии тока приведено на рис. 4.4. Влияние остаточных полей такого уровня на поле инжекции сравнимо с влиянием корректирующих магнитов, а разброс величин остаточного поля от магнита к магниту приводит к деформации орбиты при росте поля. Для решения этой проблемы к 46-му сеансу планируется подготовить программное обеспечение, необходимое для реализации режима работы корректирующих магнитов с индивидуальным заданием токов в табличном виде.

В ходе 45-го сеанса проводилось исследование режимов работы ускорителя в проектной рабочей точке, в которой ранее устойчивую работу магнитной системы обеспечить не удалось, в основном из-за технического состояния системы питания. Ранее работа ускорителя осуществлялась при рабочей точке, соответствующей значению бетатронных частот $Q \approx 7,2$ (правый верхний угол на рис. 4.5), при этом медленный вывод осуществлялся на резонансе $3Q_x = 22$.

Проектная рабочая точка, соответствующая $Q \approx 6,8$, требует большой величины тока разбаланса между дипольными магнитами и квадрупольными линзами, но с точки зрения динамики пучка она обладает целым рядом преимуществ. В первую очередь дисперсия в длинных прямолинейных проме-

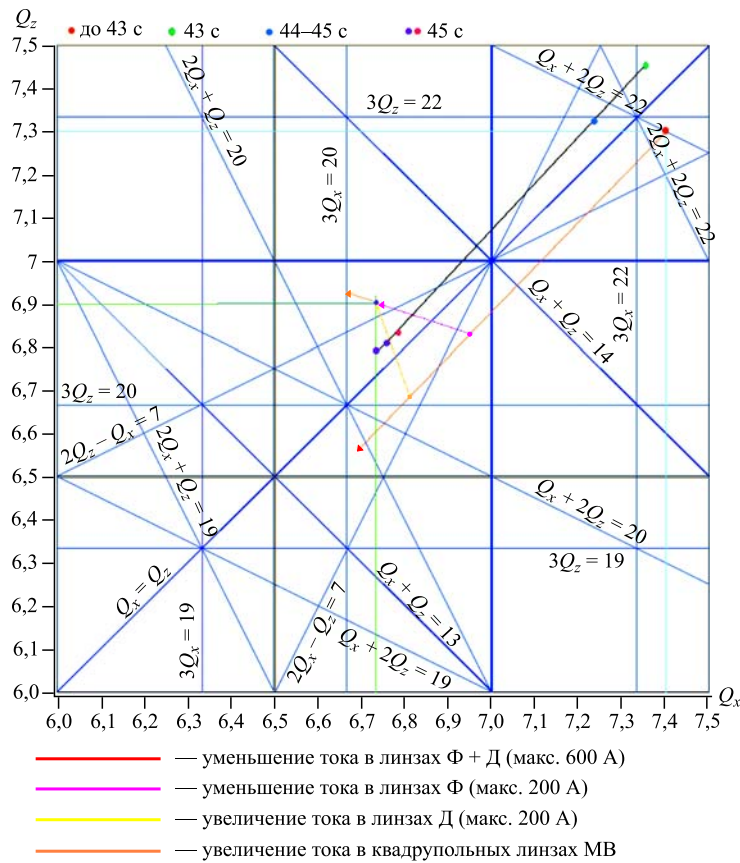


Рис. 4.5. Рабочая диаграмма нуклотрона с указанием ближайших резонансов и необходимого изменения тока линз при настройке рабочей точки

жухтах нуклотрона примерно в два раза меньше. Медленный вывод при этом осуществляется на резонансе $3Q_x = 20$.

В результате были определены требуемые параметры источника тока-отбора, необходимые для обеспечения работы в проектной рабочей точке вплоть до максимального поля дипольных магнитов. Дальнейшая оптимизация положения рабочей точки связана с вводом в эксплуатацию источника разбаланса тока в фокусирующих и дефокусирующих линзах. К 46-му сеансу проводится подготовка аппаратуры и программного обеспечения для управления этим источником.

В 45-м сеансе заметное продвижение было достигнуто в реализации адиабатического захвата пучка (АЗ). Суть работы заключается в точной синхронизации работы ЛУ-20 и канала инжекции, циклозадающей аппаратуры, ускоряющей ВЧ-системы и выборе оптимального закона изменения поля и амплитуды ускоряющего напряжения. В эксперименте пучок инжектировался на «стол» магнитного поля, соответствующего энергии инжекции, за 100–150 мс до начала его изменения. Переход со «стола» поля к его постоянному росту с постоянной производной 0,3 Тл/с осуществлялся по параболе длительностью 100 мс. Закон изменения амплитуды ВЧ-напряжения предварительно определялся численным моделированием динамики частиц [5], а в ходе настройки оптимизировался на основе анализа процесса формирования сгустков. На рис. 4.6 приведена зависимость интенсивности пучка от времени в случае, когда ВЧ-напряжение на «столе» поля менялось параболически с 500 В до 3 кВ. Переход к ускорению (на параболическом участке роста поля) сопровождался линейным ростом амплитуды ВЧ-напряжения с 3 до 6–7 кВ. При этих параметрах удалось обеспечить устойчивый процесс формирования сгустков и переход к ускорению с минимальными потерями.

Из-за значительных пульсаций тока источника разбаланса между дипольными магнитами и линзами (см. рис. 3.3) время жизни пучка на «столе» ин-

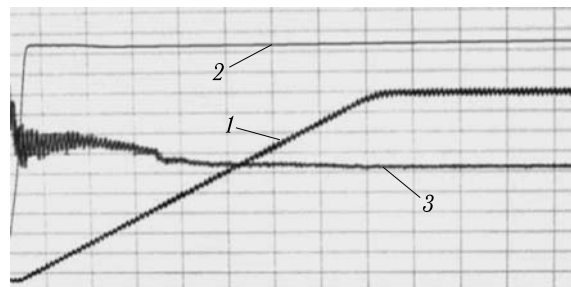


Рис. 4.6. Временные зависимости магнитного поля (кривая 1), амплитуды напряжения ускоряющего ВЧ-поля (кривая 2) и интенсивности пучка (кривая 3) в процессе АЗ. Цена деления по шкале времени 300 мс. 45-й сеанс

жекции оказалось всего около 200 мс (оно измерялось при выключенном ВЧ-напряжении). В результате за время группировки пучка его интенсивность уменьшалась примерно в два раза из-за потерь по поперечному движению, поэтому, несмотря на успешную реализацию АЗ, прогнозируемого увеличения интенсивности ускоренного пучка в 1,5–2 раза пока достигнуть не удалось.

В 46-м сеансе планируется продолжить эксперименты по АЗ в двух направлениях:

— оптимизация работы источника тока разбаланса и повторение захвата при поле инжекции;

— захват при большей энергии, для чего предполагается ускорить пучок до некоторой промежуточной энергии, распустить его на «столе» магнитного поля выше 1 кГс, где пульсации тока линз практически отсутствуют, затем повторно сгруппировать и захватить в режим ускорения.

Исследования и отладка второго режима необходимы как для полноценной реализации работы нуклотрона с несколькими «столами» поля, так и для отработки режимов работы ВЧ-системы бустера, в котором аналогичная процедура будет использоваться при электронном охлаждении пучка.

5. РАЗВИТИЕ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ

К началу 44-го сеанса были расширены функциональные возможности цифровой системы измерения положения замкнутой орбиты, что обеспечило наблюдение эволюции временной структуры сгустков. В ходе 44-го сеанса продолжалось ее тестирование: при энергии инжекции последовательно по всем пикап-электродам сравнивались показания существовавшей ранее и новой систем. С помощью новой системы были проведены измерения дисперсионной функции и критической энергии нуклотрона, знание которых необходимо для анализа результатов измерений дробового шума пучка и настройки системы стохастического охлаждения. Методика этих измерений заключается в измерении положения орбиты сгруппированного пучка, циркулирующего на «столе» магнитного поля как функции частоты обращения частиц, задаваемой ВЧ-ускоряющей системой. При малом изменении частоты ускоряющего поля изменение горизонтального положения орбиты в датчике положения пучка Δx определяется значением дисперсионной функции в точке расположения данного датчика D : $\Delta x = D \frac{\Delta p}{p}$, а относительное отклонение по импульсу связано с изменением частоты через слип-фактор ускорителя η : $\frac{\Delta p}{p} = \frac{1}{\eta} \frac{\Delta f}{f}$. Путем статистической обработки измерений, проведенных при нескольких значениях энергии пучка, можно независимо определить и значение дисперсии, и слип-фактор ускорителя. Измерения,

проведенные при энергиях 2 и 3,5 ГэВ/нуклон для рабочей точки нуклотрона $Q_x/Q_z = 7,3/7,35$ при относительном изменении частоты ускоряющей системы порядка 10^{-4} , дали значение лоренц-фактора, соответствующего критической энергии $\gamma_{\text{крит}} = 6,71$, или значению коэффициента уплотнения орбит $\alpha = 0,022$. Измеренное значение дисперсии в начале суперпериода составило $D \approx 1,1$ м. Оно находится в разумном соответствии с расчетными параметрами нуклотрона, вычисленная величина критической энергии оказалась несколько ниже расчетной, что объясняется достаточно большой погрешностью измерений. В 45-м сеансе тестирование системы «Орбита» завершено, и она принята в эксплуатацию в качестве штатной.

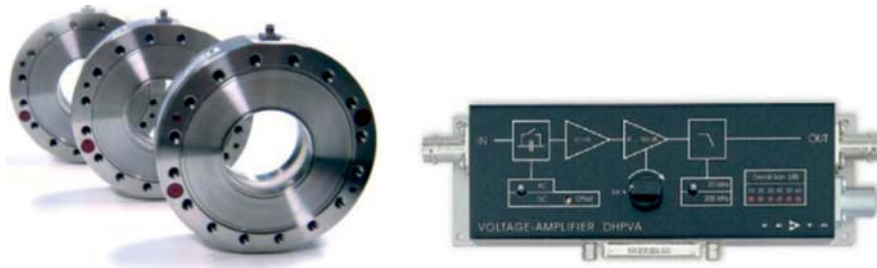


Рис. 5.1. Быстрый трансформатор тока пучка (BERGOZ FCT) (слева) и усилитель FEMTO DHPVA-200 (справа)

К началу 44-го сеанса в «теплой» секции нуклотрона был установлен быстрый трансформатор тока (рис. 5.1), позволяющий измерять пиковый ток и наблюдать временную структуру сгустков в процессе ускорения. Максимальная чувствительность трансформатора после усиления сигнала усилителем DHPVA-200 составляет 5 В/мА, что в ходе 44-го сеанса позволило настраивать процесс ускорения ионов углерода при интенсивности менее 10^8 частиц за цикл.

Испытана тестовая версия программного обеспечения быстрого трансформатора тока (рис. 5.2), позволяющая фиксировать временные зависимости тока пучка; к 46-му сеансу планируется также выводить сигналы в единицах количества циркулирующих ионов.

К началу 46-го сеанса идентичный трансформатор будет установлен в канале инжекции, что обеспечит возможность провести абсолютную калибровку показаний пикап-электродов нуклотрона. Аналогичные трансформаторы будут применяться для измерения интенсивности пучка в бустере и кольцах коллайдера проекта NICA. В бустере сигнал этого датчика планируется использовать в качестве сигнала обратной связи в системе управления ускоряющими ВЧ-станциями, разработка которой в настоящее время осуществляется в ИЯФ им. Г. И. Будкера (Новосибирск, Россия).

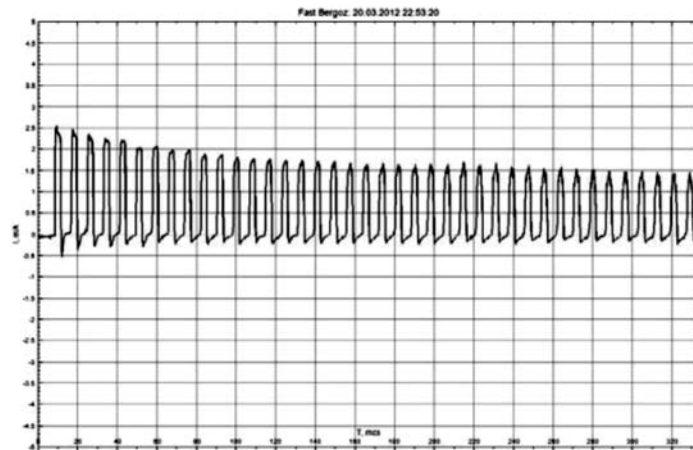


Рис. 5.2. Пример измерения зависимости тока сгустков от времени с помощью быстрого трансформатора тока. 45-й сеанс

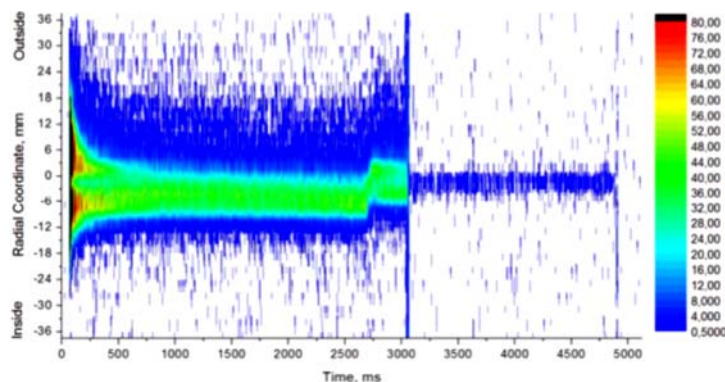


Рис. 5.3. Эволюция горизонтального профиля пучка дейтронов с интенсивностью 10^8 частиц в процессе ускорения, выхода на «стол» поля и вывода. 45-й сеанс

В ходе 44-го и 45-го сеансов продолжались работы по оптимизации режимов эксплуатации ионизационного профилометра, установленного в тепловой секции нуклотрона [2]. Показания профилометра использовались для контроля положения пучка в кикере системы стохастического охлаждения. Кроме того, одной из основных задач было исследование динамического диапазона датчика и выбор оптимального напряжения на микроканальных пластинах при настройке ускорителя в режиме с малой интенсивностью пучка (рис. 5.3), что необходимо для планируемого на 2013 г. сеанса работы с ускорением тяжелых ионов.



Рис. 5.4. Результаты измерения температуры элементов нуклотрона в процессе охлаждения. 44-й сеанс

Для обеспечения безопасной работы магнитной системы нуклотрона проводится замена существующей системы термометрии (основанной на электромеханических реле и практически полностью выработавшей свой ресурс) на современную, разработанную совместно с коллегами из Болгарии. К 44-му сеансу на нуклотроне был установлен экспериментальный фрагмент новой системы, включающей в себя два октанта магнитной системы. В ходе 44-го и 45-го сеансов проводилось его тестирование (рис. 5.4). В 46-м сеансе запланировано полномасштабное внедрение новой системы.

Стабильная и безопасная эксплуатация магнитной системы нуклотрона при максимальных уровнях поля невозможна без надежной системы датчиков перехода в нормальнопроводящее состояние. Существующая аппаратура контроля состояния и управления датчиками перехода устарела. Система отображения информации была создана в конце 80-х – начале 90-х гг. прошлого века. В сущности это был работающий макет системы, которым она и осталась до сих пор, несмотря на многочисленные изменения и улучшения, осуществленные за время эксплуатации. Существующая система построена таким образом, что с каждого датчика перехода к ней идет отдельная линия связи. Таким образом, имеется столько линий связи, сколько есть датчиков перехода. Только одно это обстоятельство требует содержания штата людей, которые обязаны проводить осмотры, предупредительные ремонты и т. п. этих проводов, которые находятся далеко не в идеальных климатических условиях. В последние годы обрыв (перегнивание) этих проводов стал самой частой неисправностью.

В рамках проекта «Нуклотрон-М» была начата работа по созданию новой системы датчиков перехода, основанной на современных технических и конструктивных решениях, подразумевающих изменение всей концепции ее построения [6].

Новая система была спроектирована на основе использования последовательных интерфейсов: все датчики подключаются к одной двухпроводной линии, по которой производится обмен информацией. Это решение позволяет

при необходимости оперативно менять количество датчиков, не разделять физически групповые и индивидуальные датчики и организовывать полное резервирование канала воздействия на систему эвакуации энергии.

В систему также вводится контроль текущего состояния всех узлов, контроль сигналов воздействия на внешние устройства и индикация неисправностей. При этом увеличивается сложность электронных блоков, но становится проще оперативное обслуживание, которое фактически сводится к замене однотипных блоков при неисправности. Аппаратура монтируется в блоках стандарта «Евромеханика» УЗ с применением стандартных узлов (источников питания, буферов и т. д.) в стойках 19".

Основным элементом системы является датчик перехода, предназначенный для сравнения аналоговых сигналов с двух соседних сверхпроводящих индуктивных элементов ускорителя для выявления изменения сигнала одного из них, вызванного появлением активной составляющей в этом элементе (потерей сверхпроводимости).

Создание новой системы потребовало полной переработки конструкции датчика, необходимой для возможности обмена данными по последовательному каналу. Кроме того, измерительный мост был вынесен из датчика, что позволяет производить его замену без повторной балансировки.

Особенностью конструкции датчиков является то, что они должны быть гальванически изолированы как от общих земляных цепей, так и друг от друга и не вносить паразитные утечки в электрические цепи ускорителя.

В соответствии с этим датчик состоит из двух конструктивных частей: изолированной части, на которой принимается и усиливается входной сигнал, и заземленной части, на которой полученный сигнал обрабатывается, анализируется и т. д.

Изолированная и заземленная части связаны между собой посредством изолирующего аналогового усилителя HCPL7800.

Датчик перехода состоит из следующих узлов (рис. 5.5).

На изолированной части:

- мостовой балансирующий резистор R_{bal} ;
- ограничитель уровня входного сигнала;
- предварительный масштабирующий усилитель с функцией интегрирования;
- аналоговый изолирующий усилитель.

На заземленной части:

- аналоговый изолирующий усилитель;
- амплитудный компаратор;
- аналоговый ключ;
- микропроцессор;
- драйверы шин;

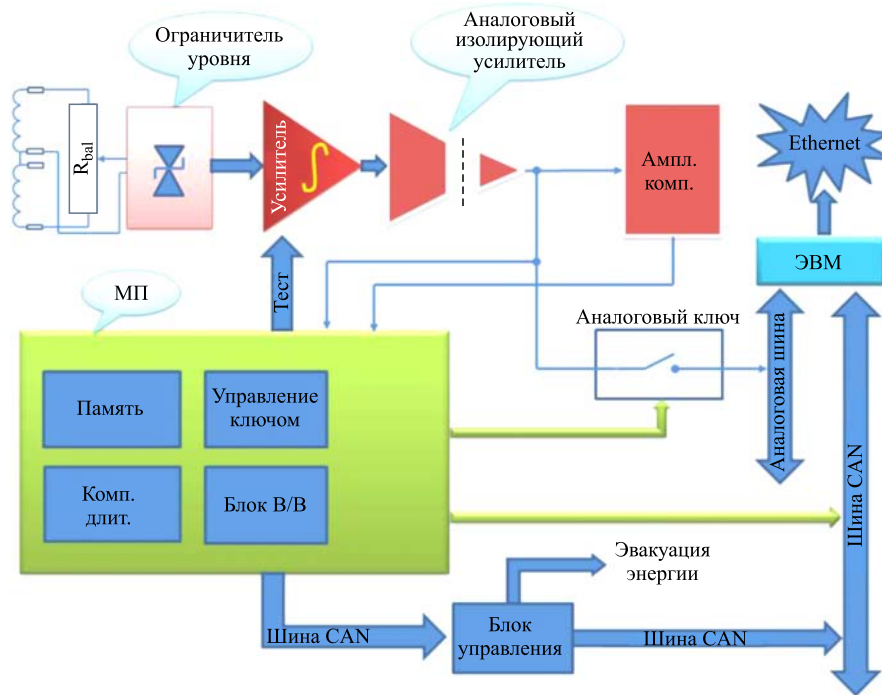


Рис. 5.5. Блок-схема датчика перехода

- изолированный преобразователь DC/DC;
- источники питания собственных нужд.

Сравнение сигналов с элементов происходит посредством соединения соседних элементов в измерительный мост (рис. 5.6). «Плечами» моста являются индуктивности элементов ускорителя и резистор, с помощью которого и производится балансировка моста. Достоинство этого метода заключается в

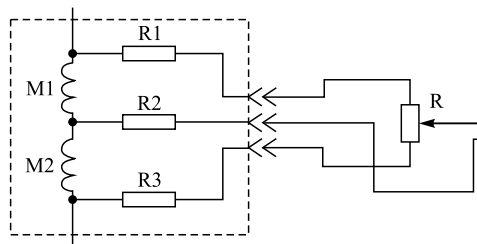


Рис. 5.6. Схема сравнения сигналов: M1 и M2 — соседние однотипные элементы магнитной системы; R1–R3 — защитные резисторы; R — балансирующий резистор

том, что мост является пассивным элементом и может сравнивать сигналы в большом динамическом диапазоне практически от 0 В до максимального напряжения на магнитных элементах. Из недостатков следует отметить то, что мост может быть сбалансирован точно только на одной частоте (в реальной работе при постоянном токе) и, следовательно, имеет паразитный разбаланс на частотах помех и резких изменениях напряжения источника питания.

Сигнал с мостовой схемы усиливается усилителем — интегратором. Интегрирование уменьшает действие коротких импульсов помех. Для уменьшения расширения коротких импульсов большой амплитуды интегратором на входе усилителя применен ограничитель амплитуды, который также защищает вход усилителя от перегрузок. Далее усиленный сигнал передается на заземленную часть датчика через аналоговый изолирующий усилитель. Поскольку обрабатывается только разностный сигнал амплитудой 0–100 мВ, можно использовать достаточно дешевый изолирующий усилитель с небольшим динамическим диапазоном входного сигнала (0–300 мВ).

Полученный сигнал разбаланса подается на вход амплитудного компаратора и на вход АЦП микроконтроллера. Этот же сигнал через аналоговый ключ может быть подключен к аналоговой шине для передачи на удаленный АЦП в составе ПК для визуального наблюдения.

Сигнал разбаланса анализируется микроконтроллером, и в случае превышения его амплитуды и времени действия больше пороговых вырабатывается сигнал на включение системы эвакуации энергии.

АЦП микроконтроллера записывает оцифрованный сигнал во внутреннюю память для дальнейшего его анализа и визуализации при необходимости.

Микроконтроллер связывает устройство (ДП) с внешними блоками и ЭВМ по шине CAN, по которой обменивается информацией и управляющими сигналами. Во время каждой паузы микроконтроллер формирует сигнал «Тест» для проверки работы всего тракта обработки сигнала и целостности кабельных линий связи. При обнаружении неисправности выдается сигнал на запрет цикла.

В ходе 39-го сеанса [3] были проведены испытания макета нового датчика перехода, которые подтвердили правильность концепции обработки сигнала и отсутствие принципиальных ошибок в схемотехническом решении. Определена минимальная частота оцифровки, при которой возможен надежный визуальный контроль формы сигнала разбаланса. На основе полученных результатов в конструкцию датчика были внесены необходимые изменения, и в ходе 41-го сеанса на прототипе датчика был зафиксирован и показан визуально реальный переход одного из магнитных элементов в резистивную фазу [7]. Для перевода магнита в резистивную фазу использовался нагреватель обмотки. В результате была продемонстрирована устойчивая и надежная работа датчика, после чего начато изготовление полного комплекта датчиков (200 штук с учетом резервирования).

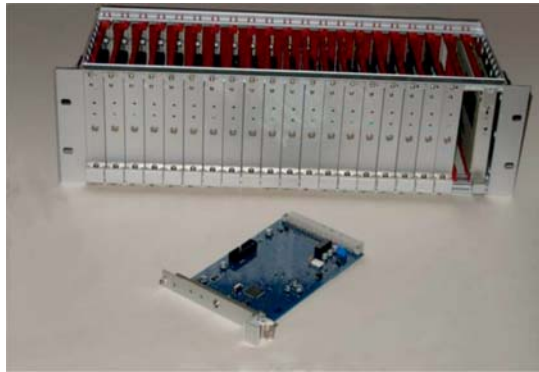


Рис. 5.7. Датчик перехода и блок, содержащий 20 датчиков

К началу 44-го сеанса было изготовлено и установлено 20 датчиков (рис. 5.7), и в ходе 44-го и 45-го сеанса проводилась их опытная эксплуатация.

В процессе эксплуатации системы защиты на двух магнитных элементах были выявлены динамические разбалансы во время подачи напряжения цикла. На начальном участке цикла магнитное поле (и, соответственно, ток, протекающий через магнитные элементы) растет со временем по параболическому закону, который затем переходит в линейный. Это соответствует линейному росту напряжения на магнитных элементах в начале цикла и некоторому постоянному значению на участке линейного роста поля. Разбалансы появлялись на участке роста напряжения и стали явно заметны, когда скорости нарастания напряжения были сильно увеличены. При временах нарастания

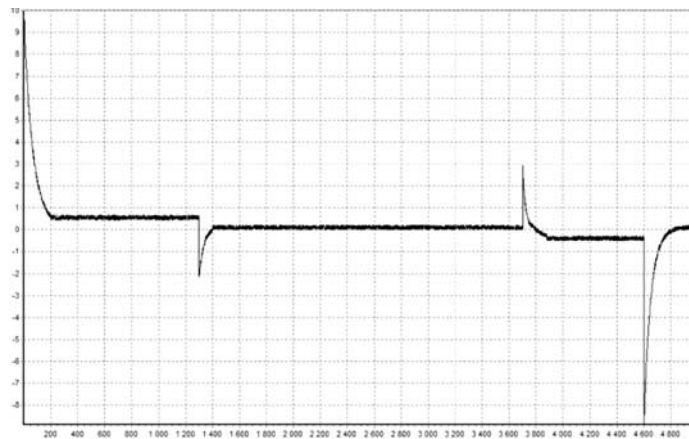


Рис. 5.8. Сигнал разбаланса в течение цикла магнитного поля. 45-й сеанс

менее 10 мс они стали критическими и приводили к ложному срабатыванию системы эвакуации энергии. Их характер при оцифровке сигнала разбаланса показан на рис. 5.8. (Для упрощения анализа сигнала мост был незначительно разбалансирован.)

Для анализа этого явления было проведено моделирование работы схемы питания магнитов на PSPICE-симуляторе в составе пакета OrCad CADENCE, позволившее сделать вывод, что оно обусловлено паразитными емкостью между средней точкой мостовой схемы и землей в цепях вывода сигнала из криостата (рис. 5.9). При резком возрастании напряжения емкостной ток создает падение напряжения на защитных резисторах в торцах магнитных

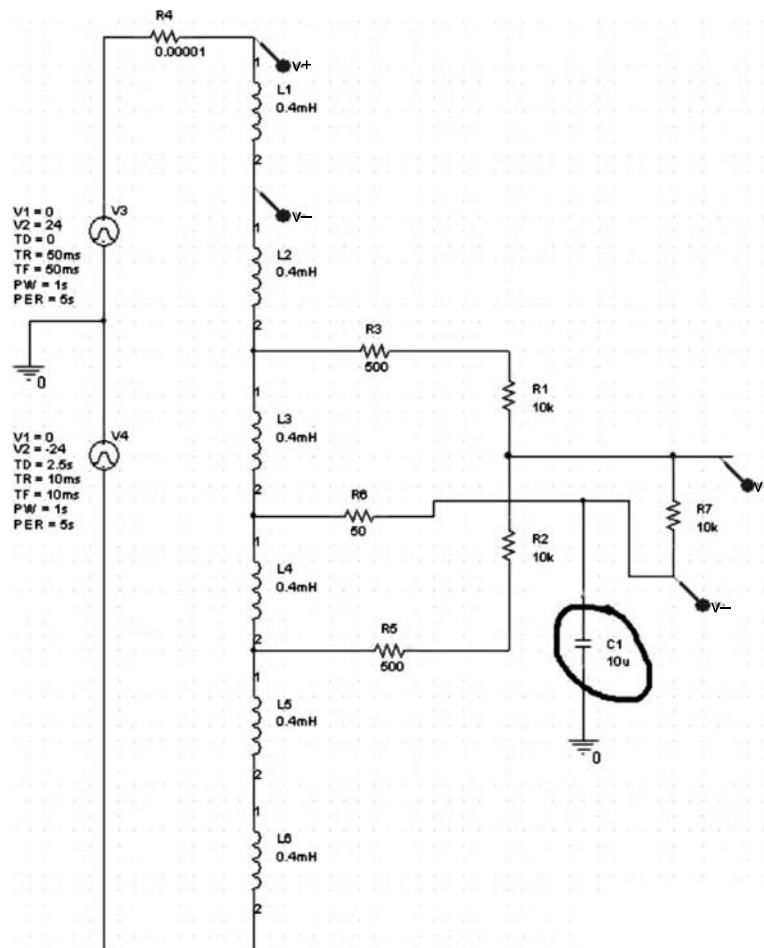


Рис. 5.9. Схема модели. В кружке — паразитная емкость

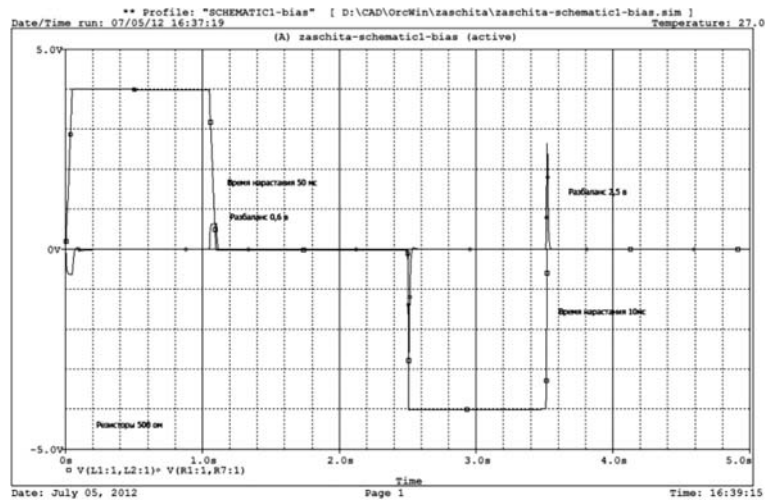


Рис. 5.10. Малая скорость при подаче напряжения и большая при спаде

элементов. При неравенстве величин этих резисторов (а они, как правило, различаются и имеют разброс минимум 10 %) и происходит разбаланс моста.

На рис. 5.10 показаны результаты моделирования при большой и малой скоростях нарастания напряжения питания, которые и подтверждают сделанные выводы. В ходе сеансов избежать ложных срабатываний системы защиты

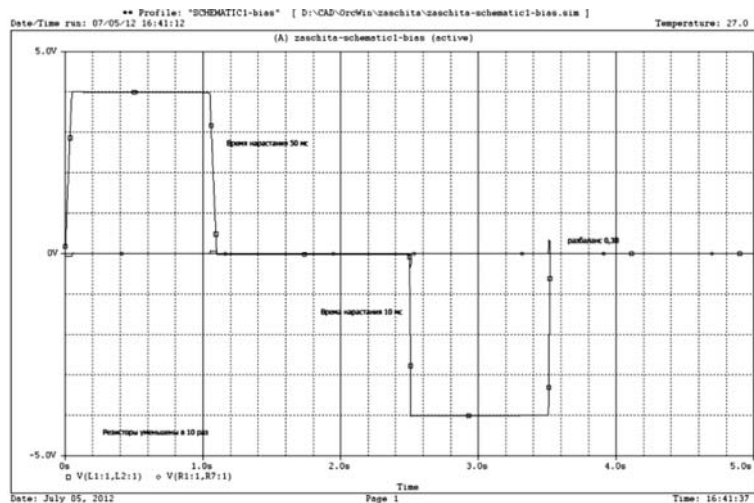


Рис. 5.11. Малое значение сопротивления защитных резисторов

удалось за счет удлинения начальных участков параболического роста поля при увеличении темпа роста поля на линейных участках (в принятой на синхротроне терминологии это называлось «приделать лыжи»).

Для радикальной борьбы с этим эффектом достаточно исключить или значительно уменьшить защитные резисторы. В качестве примера на рис. 5.11 приведены результаты моделирования при уменьшении величины резисторов защиты в 10 раз.

К началу 46-го сеанса будет проведена замена защитных резисторов на проблемных элементах магнитной системы. В 46-м сеансе планируется полномасштабное внедрение новой системы детектирования переходов в резистивную фазу.

6. ОТРАБОТКА РЕЖИМОВ РАБОТЫ С ДЛИННЫМИ «СТОЛАМИ» ПОЛЯ

В качестве основного режима работы создаваемого коллайдера NICA планируется использовать режим накопителя, т.е. в течение нескольких часов магнитная система должна работать при постоянном токе питания. Никогда ранее в таком режиме магниты нуклотронного типа не эксплуатировались, поэтому в 44-м и 45-м сеансах были проведены экспериментальные исследования особенностей работы криогенной и магнитной систем ускорителя при больших токах питания в режиме, близком к непрерывному. Кроме проверки тепловых режимов, эта работа также имеет целью уточнение требований, которым должны удовлетворять структура и функции системы управления будущего ускорительного комплекса NICA. Кроме того, режим длительной циркуляции пучка на «столе» поля необходим для настройки канала стохастического охлаждения и для наблюдения охлаждения сгруппированного пучка с большой величиной пикового тока.

Для реализации режима длинных «столов» к началу 44-го сеанса была проведена необходимая доработка подсистемы управления полем циклозадающей аппаратуры. Для регистрации тока пучка было доработано программное обеспечение для параметрического трансформатора тока BERGOZ. В штатном режиме работы основной источник питания магнитной системы управляется сигналом В-серии, вырабатываемым В-таймером циклозадающей аппаратуры на основе измерения производной поля по времени в измерительном магните. В режиме длинных «столов» для обеспечения постоянного значения поля в магнитах необходим режим работы источника, соответствующий стабилизации тока. Для реализации этого режима необходим датчик тока в силовой цепи. Из парка имеющегося оборудования был выбран шунт масляный типа ШМ 6кА–2В (рис. 6.1) Была разработана схема врезки шунта в силовую цепь с минимальными издержками. Одновременно разрабатывались



Рис. 6.1. Масляный шунт ШМ 6кА-2В

схемы вторичной коммутации защит шунта и согласование их с действующими схемами управления источниками 19ТВ и 20ТВ. Отдельно решалась задача создания электронного узла прецизионного гальванически развязанного операционного усилителя на базе микросхемы AD210J для схем регулирования. После проработки всех направлений в сжатые сроки ШМ 6кА-2В был включен и протестированы схемы защит и стабилизации.

В ходе 44-го сеанса была проверена работа магнитной системы нукло-трона при поле 8 кГс и длительности стола до 500 с (рис. 6.2), в этих испытаниях ускорение пучка не проводилось.

В ходе 45-го сеанса исследовались режимы циркуляции ускоренного пучка при последовательном удлинении «стола», начиная с длительности в 30 с. Проводилось сравнение времени жизни пучка на «столе» при работе основного источника питания в режиме стабилизации тока и в режиме



Рис. 6.2. Диаграмма цикла магнитного поля при длительности «стола» 500 с. 44-й сеанс

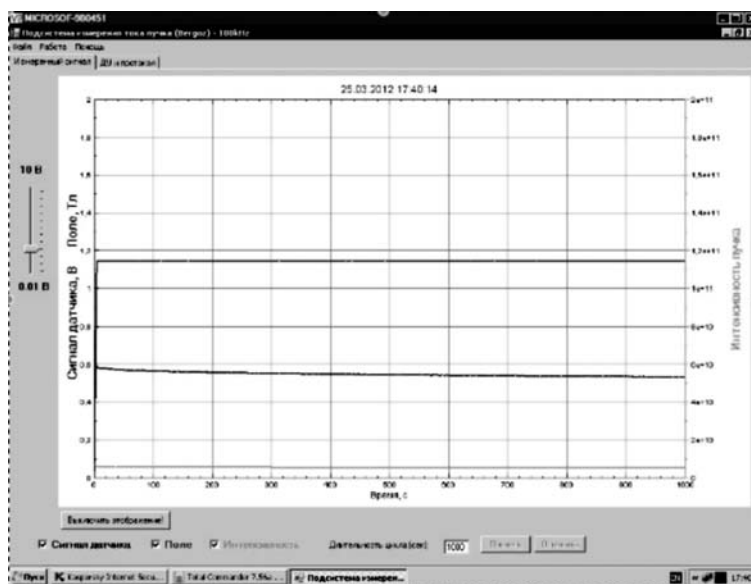


Рис. 6.3. Циркуляция пучка дейтронов на «столе» поля длительностью 1000 с. Верхняя линия — сигнал датчика магнитного поля, две нижних линии — сигналы от ускоренного пучка дейтронов с трансформатора тока (прямой и пересчитанный в число ионов), 45-й сеанс

стабилизации поля. Из-за дрейфа В-таймера в режиме стабилизации поля за время примерно 30 с происходит уход орбиты на полную апертуру камеры, что приводит к гибели пучка. В режиме стабилизации тока получено время жизни пучка на «столе» 1,2 Тл (что соответствует энергии примерно 3 ГэВ/нуклон) существенно большее чем 1000 с (рис. 6.3).

К 46-му сеансу планируется доработка циклозадающей аппаратуры и программного обеспечения с учетом результатов 45-го сеанса, будет реализована программная коррекция дрейфов В- и G-таймеров. Кроме того, в 46-м сеансе планируется проведение измерения зависимости времени жизни циркулирующего пучка от положения рабочей точки ускорителя.

7. ТЕСТИРОВАНИЕ АППАРАТУРЫ СТОХАСТИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Важность работ по экспериментальному исследованию стохастического охлаждения определяется тем, что ряд особенностей коллайдера NICA не позволяет напрямую применить технические решения, используемые в зарубеж-

ных научных центрах. А в России опыт разработки и эксплуатации систем стохастического охлаждения практически отсутствует. Наибольшей трудностью является необходимость охлаждать сгруппированный пучок с большой величиной пикового тока. Поэтому разработка системы охлаждения коллайдера требует проведения предварительных экспериментальных исследований по изучению предельных возможностей метода. Важность экспериментальных исследований стохастического охлаждения неоднократно подчеркивалась на митингах Международного экспертного комитета (Machine Advisory Committee). Предварительная оценка возможности реализации стохастического охлаждения на нуклотроне была сделана на основе простейшей теоретической формулы для характерного времени охлаждения τ , справедливой при оптимальном набеге фаз от пикапа до кикера и оптимальном усилении в линии обратной связи:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{W(1 - \widetilde{M}^{-2})^2}{NM + U/Z^2}, \quad (7.1)$$

где W — ширина полосы пропускания линии обратной связи; N — количество частиц в ускорителе с учетом фактора группировки; M — фактор перемешивания частиц при пролете от кикера до пикапа и \widetilde{M} — при пролете от пикапа до кикера соответственно; U — отношение мощностей шум/сигнал; Z — заряд иона. Для уменьшения времени охлаждения желательно иметь полосу пропускания системы W как можно шире, однако кроме ограничений, связанных с техническими возможностями мощной электроники, ширина полосы ограничена параметрами ускорителя и разбросом по импульсу в охлаждаемом пучке. Время пролета частицы от пикапа до кикера увеличивается (или уменьшается), если ее импульс отличается от номинального значения. Если разница между временами пролета частицы и прохождения сигнала через радиотехническую линию становится больше длительности импульса, приложенного к кикеру, охлаждение перестает работать. Максимальный относительный разброс по импульсу сгруппированного пучка не может превышать динамического аксептанса нуклотрона, примерно равного $\Delta p/p = \pm 10^{-2}$. С некоторым запасом, верхняя частота полосы пропускания была выбрана равной 4 ГГц. Выбор нижней границы полосы пропускания определяется из следующих соображений. Пикап и кикер — резонансные устройства, их проектируют на среднюю частоту полосы пропускания, при этом их чувствительность симметрично «спадает» при больших и меньших частотах. Для обеспечения приемлемой чувствительности во всем диапазоне частот верхняя частота, как правило, выбирается в два раза больше нижней. При верхней границе 4 ГГц это условие соответствует диапазону 2–4 ГГц, который хорошо освоен в мировой практике и не представляет серьезных радиотехнических трудностей. При такой полосе оценка по формуле (1) дает характерную величину времени охлаждения примерно 10 с при интенсивно-

сти распущенного пучка порядка 10^9 частиц. Такой уровень интенсивности в нуклотроне легко достижим как для протонов или дейтронов, так и для пучков легких ионов, например C^{6+} , а характерное время охлаждения 10 с достаточно удобно для режима настройки системы.

Выбор структуры и характеристик основных компонентов канала был осуществлен на основании численного моделирования процесса охлаждения [8], которое показало, что при охлаждении протонного распущенного пучка с интенсивностью 10^9 частиц оптимальное усиление сигнала в цепи обратной связи составляет приблизительно 140 дБ (с учетом потерь во всех пассивных элементах схемы) — это соответствует выходной мощности усилителя в пределах 30–40 Вт. Для пучка ионов углерода (C^{6+}) той же интенсивности требования к необходимой мощности и усилению понижаются до 10 Вт и 130 дБ соответственно. Таким образом, параметры нуклотрона позволяют реализовать стохастическое охлаждение пучков при технически разумных характеристиках системы обратной связи. Для наблюдения охлаждения сгруппированного пучка требуется работа нуклотрона со «столами»

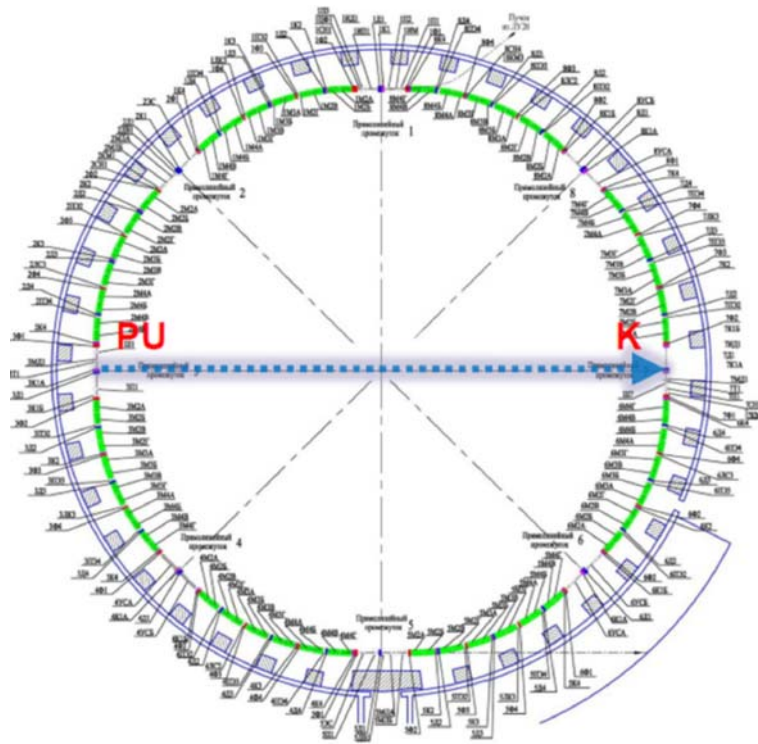


Рис. 7.1. Схема кольца нуклотрона с выбранным расположением элементов системы охлаждения: пикапа (ПУ) и кикера (К)

поля заметно большей продолжительности, возможность работы в таком режиме и была продемонстрирована в ходе 44-го и 45-го сеансов.

Кикер-станция системы стохастического охлаждения должна находиться при комнатной температуре (ввиду того, что в ней выделяется достаточно большая тепловая мощность). В нуклотроне имеется единственный «теплый» прямолинейный промежуток (7-й по ходу пучка начиная с точки инъекции), в котором располагается станция внутренних мишеней. В этом же промежутке имеется достаточно места и для размещения кикера. При этом для размещения пикапа оптимальным является 3-й промежуток, расположенный диаметрально противоположно 7-му (рис. 7.1). В этом промежутке нет встроенных устройств, но во время работы ускорителя он находится при криогенной температуре (от 4 до 15 К), что позволяет уменьшить мощность теплового шума с пикапа.

В качестве пикапа и кикера было решено использовать две одинаковых радиотехнических сборки (рис. 7.2). Они представляют собой системы кольцевых электродов, разработанные в коллаборации с Исследовательским центром FZJ (Юлих, Германия) и используемые так же, как прототип для будущего накопителя HESR (High Energy Storage Ring), сооружаемого в рамках проекта FAIR (Дармштадт, Германия). Пикап и кикер имеют аналогичную конструкцию: это сборка из 16 колец с внутренней апертурой 90 мм. Каждое кольцо структуры имеет 8 короткозамкнутых позолоченных электродов, расположенных равномерно по азимуту (рис. 7.3).

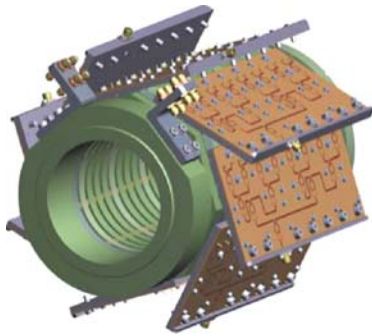


Рис. 7.2. Конструкция пикапа/кикера

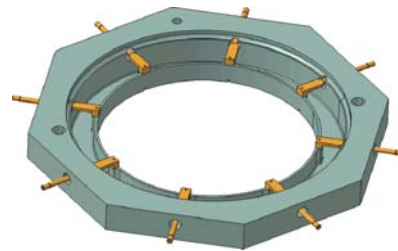


Рис. 7.3. Одно из 16 колец пикапа

Сигналы с электродов, находящихся под одним азимутом на разных кольцах, собираются соединительными платами, которые имеют точно настроенные задержки для разных колец, чтобы сигнал в плате распространялся синхронно с пучком. Таким образом, структура имеет соответственно восемь выходов, которые затем можно произвольно комбинировать (рис. 7.4)

В период с 2009 по 2011 г. была проведена конструкторская разработка вариантов размещения радиотехнической структуры пикап-станции на нуклотроне. При проектировании были учтены криогенные требования к магнитно-криостатной системе, рассчитаны теплопритоки и выбрана оптимальная конфигурация охлаждения вакуумной камеры на участке размещения пикап-станции двухфазным гелием из прямого гелиевого коллектора нуклотрона. Для пикап-станции были разработаны и изготовлены специальные высоковакуумный кожух и криостат (рис. 7.5 и 7.6).



Рис. 7.4. Пикап в сборе с элементами вакуумной камеры и кабелями для вывода сигналов на контактные сборки

Восемь выходных сигналов с соединительных плат пикапа с помощью специального СВЧ-кабеля с малыми потерями выводятся из криостата через два высоковакуумных фланца с сваренными в проходной керамический изолятор разъемами типа SMA (по 4 шт. на каждый фланец). Конструкции криостата и вакуумного кожуха позволяют разместить внутри вакуумного объема кроме пикап-станции дополнительную диагностику пучка: оборудование

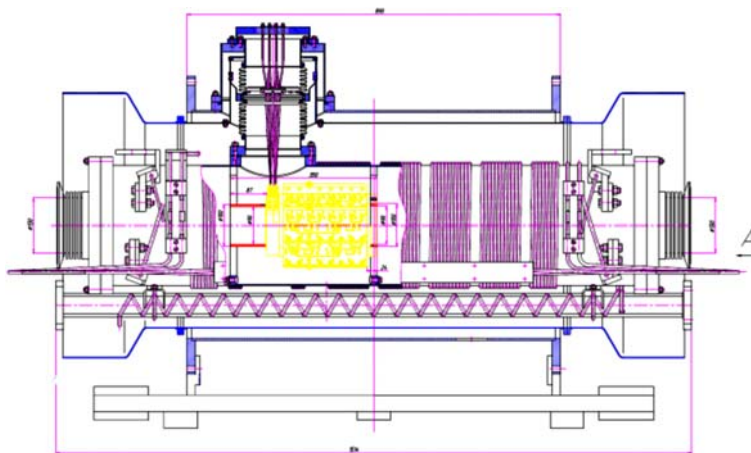


Рис. 7.5. Конструкция криостата для размещения пикап-станции в магнитно-криостатной системе нуклотрона

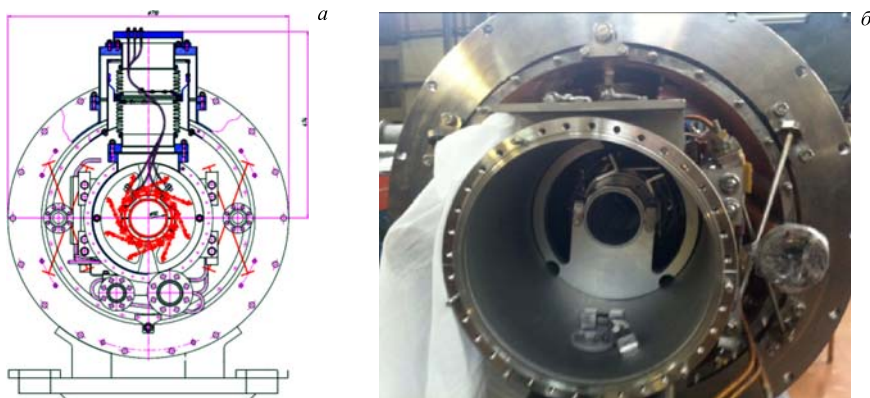


Рис. 7.6. *а)* Поперечное сечение криостата с размещенной в нем пикап-станцией; *б)* фотография собранного криостата с пикап-станцией внутри

с линейным размером до 600 мм и диаметром до 250 мм. В сентябре 2011 г. изготовление и сборка криостата пикапа были завершены (рис. 7.6).

После успешно проведенных на стенде вакуумных и криогенных испытаний всей описываемой сборки, а также измерений высокочастотных характеристик пикап-станции при гелиевых температурах (4,5 К) криостат был установлен в кольце нуклотрона (рис. 7.7).

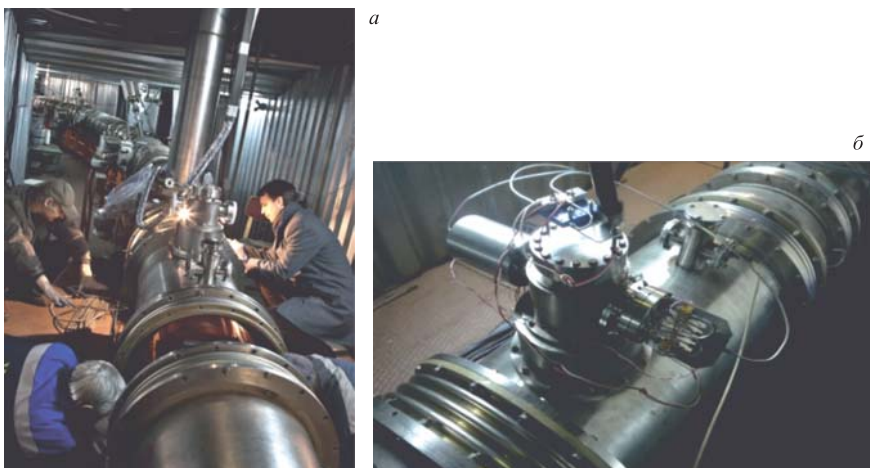


Рис. 7.7. *а)* Установка криостата с пикапом в 3-м прямолинейном промежутке нуклотрона; *б)* собранный и установленный криостат с пикап-станцией в кольце нуклотрона. На выводном фланце видны специальные сборки из усилителей и гибридных соединителей сигналов

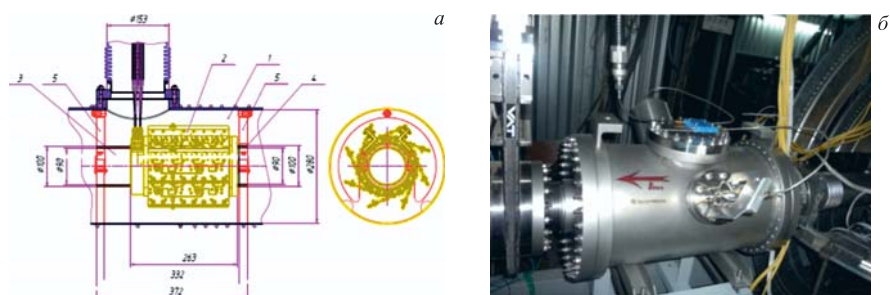


Рис. 7.8. а) Слева — вакуумная сборка кикер-станции: 1 — вакуумный кожух; 2 — радиотехническая сборка (кикер) из монтажных плат; 3 — вакуумная камера; 4 — узел крепления и юстировки структуры внутри вакуумного кожуха; 5 — юстировочная обечайка. Справа — поперечное сечение конструкции; б) установленный в кольце нуклотрона кикер

В результате комплексных НИОКР, проведенных в ЛФВЭ в 2010 г., была разработана конструкция размещения кикера в «теплой» секции нуклотрона и изготовлена при участии фирмы «Вакуум-Прага» специальная высоковакуумная камера. Затем кикер был установлен внутри камеры, и вся сборка после вакуумных испытаний была штатно установлена в магнитно-криостатной системе нуклотрона на месте ранее существовавшего коробчатого электростатического пикап-модуля (рис. 7.8).

Поперек здания, от места расположения пикапа до кикера, был проложен фидерный кабель с высокой скоростью распространения сигнала, малой групповой задержкой и малым коэффициентом потерь (7 дБ/м). Таким образом, к началу 44-го сеанса нуклотрона все элементы канала охлаждения были установлены в кольце и в ходе 44-го и 45-го сеансов проводились работы по их тестированию и изучению методик настройки параметров обратной связи.

Созданный на нуклотроне канал стохастического охлаждения обладает необходимой универсальностью, и его планируется последовательно использовать для проверки различных методов охлаждения продольной степени свободы распущенного и сгруппированного пучка: метода режекторного фильтра, метода Пальмера и времяпролетного метода. Для исследования охлаждения поперечных степеней свободы частиц необходимо обеспечить нужный набег фазы поперечных колебаний на участке от пикапа до кикера, что может быть достигнуто перестройкой рабочей точки ускорителя. Осуществленная модернизация основной системы питания нуклотрона способна обеспечить требуемую гибкость при настройке рабочей точки ускорителя.

На первом этапе исследований было решено реализовать стохастическое охлаждение продольной степени свободы методом режекторного фильтра (так называемого нотч-фильтра) как наименее критичным к качеству на-

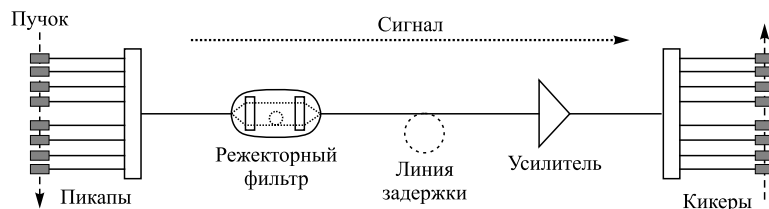


Рис. 7.9. Схема передачи сигнала от пикапа к кикеру, включающая периодический режекторный фильтр, усилитель и задержку

стройки ускорителя. Этот метод заключается в следующем: в цепь обратной связи (рис. 7.9), передающей сигнал от пикапа к кикеру, включается радиотехнический фильтр, который «вырезает» из основного сигнала гармоники частоты обращения равновесной частицы и инвертирует фазу сигнала. В результате сигнал коррекции не воздействует на равновесные частицы, но в то же время доускоряет медленные частицы и замедляет быстрые, т. е. уменьшает разброс по продольной компоненте импульса.

Кроме сигнала, наведенного на пикапе равновесной частицей, в нем присутствуют и сигналы, наведенные другими частицами пучка. Этот некогерентный эффект зависит от мощности дробового шума пучка (шоттки-шума) и приводит к диффузионному увеличению разброса по импульсу. Причиной еще одного источника «нагрева» пучка, связанного с работой системы охлаждения, являются тепловые шумы элементов радиотехнического тракта, приложенные к кикеру.

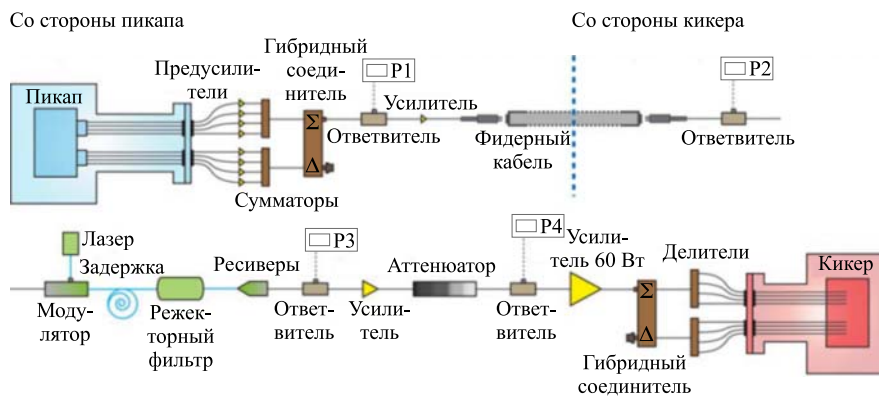


Рис. 7.10. Схема канала продольного стохастического охлаждения для нуклотрона. На рисунке позициями P1, P2, P3, P4 обозначены места подсоединения диагностической аппаратуры: в позициях 1, 2, 3 — векторный анализатор спектра, в позиции 4 — сетевой анализатор

Полная схема канала охлаждения для нуклотрона выглядит, как показано на рис. 7.10. Ее разработка проводилась в тесном сотрудничестве с Исследовательским центром FZJ (Юлих, Германия). Для охлаждения продольной степени свободы необходимо, чтобы сигнал с пикапа был пропорционален полному току. Поэтому 8 сигналов с пластин пикапа после предварительных усилителей объединяются в один с помощью СВЧ-сумматоров и гибридного соединителя. Для диагностики радиотехнической линии и наблюдения эффекта охлаждения в схему на разных участках включены ответвители, которые отделяют от основного сигнала небольшую его часть для измерений с помощью сетевого анализатора. К первому ответвителю (позиция P1 на рис. 7.10) стационарно подключается анализатор спектра для наблюдения дробового шума пучка (шоттки-шума), по которому и оценивается эффект охлаждения.

После ответвителя сигнал еще раз усиливается (предварительный усилитель на 34 дБ) и с помощью фидерного кабеля передается по туннелю к диаметрально противоположной точке кольца нуклотрона, где расположен режекторный фильтр с оптической задержкой. После оптической задержки и режекторного фильтра, чтобы скомпенсировать потери, сигнал еще раз усиливается. Подстройка усиления всей системы осуществляется следующим далее переменным аттенуатором, после которого сигнал попадает в основной мощный усилитель, максимальная выходная мощность которого составляет 60 Вт. Затем с помощью гибридного соединителя и делителей сигнал коррекции разделяется на 8 частей и, наконец, создает напряжение на пластинах кикера, которое корректирует разброс частиц пучка по импульсу.

Схема режекторного фильтра на основе оптической линии задержки была разработана в сотрудничестве с Исследовательским центром FZJ в Юлихе (правая часть схемы на рис. 7.11). Принцип его работы следующий: луч лазера модулируется входным ВЧ-сигналом с пикапа и затем делится пополам делителем. В длинной ветви фильтра установлена задержка, примерно равная периоду обращения, и дополнительная прецизионная регулируемая задержка (0–330 пс) для более тонкой подстройки. В короткой ветви фильтра устано-

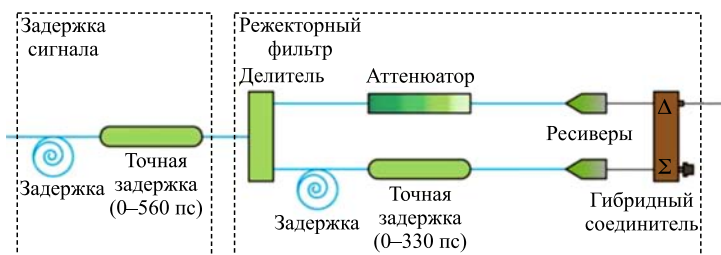


Рис. 7.11. Схема оптической задержки и режекторного фильтра

влен регулируемый аттенюатор для выравнивания амплитуды сигналов. Далее оптический сигнал в каждом плече преобразуется обратно в высокочастотный с помощью ресиверов. Полученные сигналы вычитаются гибридным соединителем. При точном равенстве амплитуд вычитаемых сигналов амплитуда сигнала на выходе гибридного соединителя зависит от частоты f как $\sin(\pi f T_0)$, где T_0 — временная задержка в длинной ветви фильтра. Она обращается в ноль при частотах, кратных $1/T_0$, а при переходе амплитуды через 0 фаза сигнала скачком меняется на π . Качество фильтра определяется характеристиками аттенюатора в короткой ветви фильтра и дисперсией сигнала в длинной ветви. Перед делителем установлена оптическая задержка, которая регулирует полное время прохождения сигнала по цепи обратной связи.

Оптическую часть цепи было решено собрать на основе многофункциональной платформы для тестирования и измерений оптоволоконных сетей JDSU MAP-200 (MAP — Multiple Application Platform). Она включает в себя лазер на основе распределенного брэгговского отражателя, позволяющий точно ($\pm 0,016$ нм) настраивать частоту излучаемого света (используется 1550 нм) и регулировать выдаваемую мощность излучения от 7 до 13 дБ/м. Перед установкой в туннеле нуклотрона оптический режекторный фильтр был собран на специальном СВЧ-стенде для экспериментальных исследований и настройки. В результате исследования различных режимов его работы было достигнуто требуемое качество настройки: с необходимой регулярностью «вырезаны» частоты, соответствующие частотам обращения пучка при энергиях планируемого эксперимента.

Полоса пропускания линии обратной связи включает в себя порядка 2000 гармоник частоты обращения пучка. Оптимальная настройка канала стохастического охлаждения основана на последовательном измерении параметров обратной связи на каждой из гармоник. Полное время, необходимое для настройки системы, определяется выбором оптимальной длительности «стола» магнитного поля и полной продолжительности цикла и составляет несколько ускорительных смен.

В ходе 44-го сеанса в первую очередь были проведены измерения дробового шума пучка (шум Шоттки) во всей полосе пропускания канала (при этом анализатор спектра последовательно подключался в разных точках) и экспериментально измерены величины импульсного разброса для пучка дейтронов (d) и ионов углерода (C^{6+}) в широком диапазоне энергий. Характерная интенсивность ионов углерода в ходе измерений составляла порядка $1-2 \cdot 10^9$ частиц/импульс, интенсивность пучка дейтронов — от $5 \cdot 10^9$ до $2 \cdot 10^{10}$ частиц/импульс. В качестве примера на рис. 7.12 приведены спектрограммы, полученные при энергии 2 ГэВ/нуклон для пучка дейтронов и ядер углерода. Характерная ширина пиков соответствует относительному разбросу по импульсу $\Delta p/p \sim 8,1 \cdot 10^{-4}$ для дейтронов и $\Delta p/p \sim 9,5 \cdot 10^{-4}$ для ионов углерода.

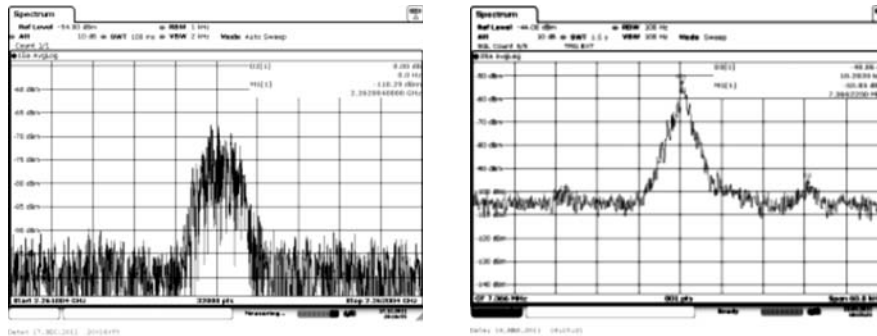


Рис. 7.12. Примеры измеренных спектров шума пучка. Слева — пучок дейтронов; справа — пучок ионов C^{6+}

Основное внимание в ходе дальнейших экспериментов было направлено на освоение методик настройки канала охлаждения методом режекторного фильтра. Сама процедура настройки включает в себя две относительно независимые операции: настройку режекторного фильтра на частоту обращения пучка и прецизионную настройку задержки в линии обратной связи.

Методика настройки режекторного фильтра исследовалась в экспериментах с пучком ионов углерода при энергии 2 ГэВ/нуклон. При этих измерениях цепь обратной связи размыкается, а анализатор спектра подключается на выходе режекторного фильтра (рис. 7.13). Оптоволоконная задержка в длинной ветви фильтра подбирается соответствующей расчетной частоте обращения пучка при энергии эксперимента, параметры фильтра предварительно оптимизируются на стенде. В ходе измерений величина прецизионной регулируемой задержки в длинной ветви фильтра дистанционно подстраивается таким образом, чтобы на всех гармониках частоты обращения в полосе пропускания системы частоты, «вырезаемые» фильтром, наиболее точно совпадали с положением максимума сигнала дробового шума пучка.

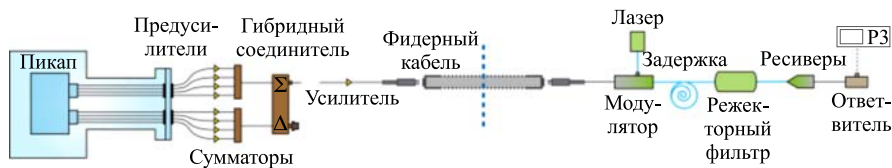


Рис. 7.13. Схема экспериментальной настройки режекторного фильтра

В отсутствие пучка зависимость амплитуды спектральной плотности шума на выходе режекторного фильтра от частоты в линейном масштабе близка к синусоидальной. Минимумы этой зависимости соответствуют частотам, «вы-

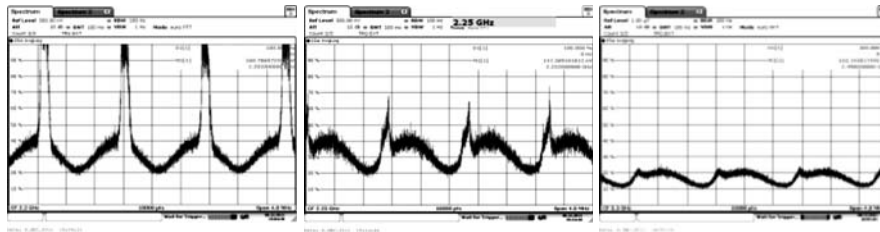


Рис. 7.14. Три спектра дробового шума пучка C^{6+} на выходе режекторного фильтра, снятые при последовательно изменяемой задержке в длинной ветви фильтра. На крайней правой спектрограмме фильтр практически «вырезает» частоту обращения пучка

резаемым» фильтром. При неточной настройке фильтра линии дробового шума пучка отчетливо видны на фоне этой зависимости (левая спектрограмма на рис. 7.14). При изменении задержки в длинной ветви фильтра положения минимумов амплитуды шума смещаются по частоте (средняя спектрограмма на рис. 7.14) и при точной настройке совпадают с максимумом сигнала дробового шума пучка, при этом амплитуда шума пучка существенно уменьшается (правая спектрограмма на рис. 7.14). Прецизионная настройка фильтра осуществляется при отображении спектра в логарифмическом масштабе, с последовательным измерением дробового шума на всех гармониках частоты обращения в полосе пропускания системы.

Прецизионная настройка временной задержки сигнала в линии обратной связи осуществляется методом измерений передаточной функции пучка, проводимых по схеме, приведенной на рис. 7.15. При этом линия обратной связи размыкается перед входом основного усилителя, и в этой точке располагается сетевой анализатор. Выходной сигнал генератора качающейся частоты сетевого анализатора подается на вход мощного усилителя и затем прикладывается к пучку. Сигнал от пучка, зарегистрированный пикапом, по линии обратной связи передается на вход сетевого анализатора, который измеряет отношение амплитуд и сдвиг по фазе между выходным и входным сигналами. Предварительно с помощью сетевого анализатора были прецизионно измерены величины задержек всех элементов радиотехнической цепи, а также

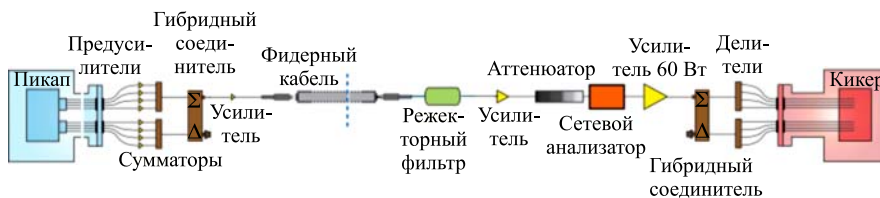


Рис. 7.15. Схема настройки временной задержки сигнала в линии обратной связи

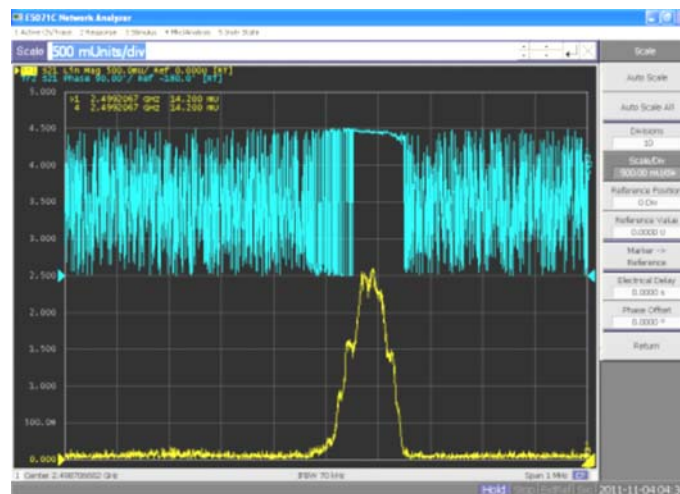


Рис. 7.16. Измерение передаточной функции ускоренного пучка ($d, E_{\text{кин}} = 2$ ГэВ/нуклон) на «столе» магнитного поля. Верхний сигнал — разность фаз между выходным и входным сигналами, нижний — отношение амплитуд

рассчитаны времена прохождения частицы от пикапа к кикеру при энергии эксперимента с учетом того, что точная дистанция от центра пикапа до центра кикера «по кольцу» составляет 127 120 мм. На основании этих результатов выбирается длина оптоволоконного кабеля в линии задержки, и дальнейшая настройка заключается в корректировке времени прохождения сигнала с помощью регулируемой прецизионной задержки перед входом режекторного фильтра.

Принцип метода настройки заключается в следующем. Сигнал от кикера к пикапу передается со скоростью пучка, при этом, если время распространения сигнала в линии обратной связи равно времени пролета пучка от пикапа к кикеру, то разность фаз сигналов на выходе и на входе сетевого анализатора на всех гармониках частоты обращения будет одной и той же, с точностью до $2\pi n$, где n — целое число. Измерения производятся на распущенном пучке, поэтому сетевой анализатор запускается на «столе» магнитного поля с некоторой задержкой после выключения ускоряющего ВЧ-напряжения. Модуляция продольной плотности частиц, регистрируемая пикапом, возбуждается кикером только на частотах, присутствующих в спектре частот обращения частиц. Поэтому сигнал отношения амплитуд выходного и входного сигнала вблизи гармоники частоты обращения повторяет по форме спектр дробового шума пучка (нижний сигнал на рис. 7.16). Амплитуда сигнала генератора качающейся частоты сетевого анализатора подбирается так, чтобы устойчиво регистрировать сдвиг фаз между выходным и входным сигналами.

Сдвиг фазы, соответствующий максимуму амплитуды входного сигнала, измеряется последовательно на всех гармониках частоты обращения в полосе пропускания системы. Затем регулируемая прецизионная задержка выставляется таким образом, чтобы сдвиг фаз имел одно и то же значение для максимально возможного количества гармоник. Предельно достижимая точность настройки определяется фазочастотными характеристиками элементов линии обратной связи.

В ходе 44-го сеанса все элементы созданного комплекса аппаратуры были последовательно протестированы, методики настройки канала продольного охлаждения методом режекторного фильтра были освоены под руководством специалиста из Исследовательского центра в Юлихе. Была продемонстрирована возможность настройки элементов канала стохастического охлаждения во всем диапазоне энергий работы будущего коллайдера комплекса NICA (1–4 ГэВ/нуклон). Экспериментально показано, что выбранная конструкция и радиотехнические параметры структур пикап-станции и кикер-станции в целом удовлетворяют требованиям к системе стохастического охлаждения в коллайдере NICA.

Из-за задержки с поставкой оборудования в ходе подготовки и проведения 44-го сеанса оптическая часть канала обратной связи была реализована на оборудовании, арендованном в московской фирме. В ходе 45-го сеанса техническая возможность реализации всех элементов обратной связи отсутствовала и проводились только исследования дробового шума пучка. В настоящее время JDSU MAP-200 получен, и в 46-м сеансе планируется продолжить работы по настройке охлаждения пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

44-й сеанс нуклотрона, продолжавшийся более чем полтора месяца, оказался самым длительным за всю историю существования ускорителя. К настоящему времени отработаны все технологические процедуры, необходимые для проведения профилактических и ремонтных работ на криогенном комплексе и магнитокриостатной системе кольца нуклотрона, без прекращения сеанса. Фактически продемонстрирована возможность проведения сеансов продолжительностью два-три месяца. Ограничение по полному времени работы комплекса связано в первую очередь с кадровыми проблемами. По нескольким системам по-прежнему остро ощущается недостаток высококвалифицированных кадров, способных восстановить режимы работы во внештатных ситуациях. Ситуация, близкая к критической, сложилась в диспетчерской службе нуклотрона. Для ее преодоления в ходе 45-го сеанса несколько молодых сотрудников проходили стажировку для работы в качестве диспетчеров. Другая сторона кадровой проблемы заключалась в том, что те же люди, которые

активно заняты в подготовке и проведении сеансов, являлись и основными разработчиками проекта NICA, объем работ по которому лавинообразно возрастает. Поэтому оптимальным режимом работы ускорительного комплекса представляется проведение двух сеансов в год с общей продолжительностью 2000–2500 ч при минимизации затрат на технологические операции и исключении незапланированных простоев.

В качестве одной из основных задач «ускорительных» смен на ближайшие сеансы является обеспечение требуемого качества медленного вывода пучка. С этой целью ведется восстановление 4-й резонансной квадрупольной линзы, проводятся работы по расширению диапазона тока и повышению быстродействия источника питания резонансных линз. Для снижения пульсаций основного источника питания планируется использовать активный фильтр на «столе» поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://nucloweb.jinr.ru/nucloserv/statist/stat-main.htm>
2. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 42-го и 43-го сеансов нуклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-2011-72. Дубна, 2011.
3. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 39-го сеанса нуклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-2009-131. Дубна, 2009.
4. *Карпинский В. Н. и др.* Развитие системы питания нуклотрона // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 7(163). С. 835–842.
5. *Волков В. И., Елисеев А. В., Иссинский И. Б., Коваленко А. Д.* Моделирование адиабатического захвата пучка нуклотрона в режим ускорения. Сообщение ОИЯИ Р9-2003-154. Дубна, 2003.
6. *Коваленко А. Д. и др.* Проект «Нуклотрон-М». Дубна: ОИЯИ, 2007.
7. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 40-го и 41-го сеансов нуклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-2010-68. Дубна, 2010.
8. *Трубников Г. В., Шурхно Н. А., Сидорин А. О.* Моделирование процесса стохастического охлаждения с помощью уравнения Фоккера–Планка. Расчет конструкции системы стохастического охлаждения для нуклотрона // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2012. Т. 1, сер. 10. С. 70.

Получено 18 октября 2012 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 14.02.2013.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 2,75. Уч.-изд. л. 3,26. Тираж 235 экз. Заказ № 57916.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/